Enjeux de la modélisation et de la conception des actionneurs électromécaniques des commandes de vol électrique

Objet

Rappeler le concept d'avion plus électrique, les technologies et les principaux systèmes d'actuation envisagés, les principales caractéristiques des actionneurs électromécaniques.
Faire une comparaison de différents systèmes d'actuation et des différents actionneurs électromécaniques.
Faire une bibliographie des travaux de recherche et des études de faisabilité publiés dans les principales revues internationales sur l'utilisation des actionneurs électromécaniques dans les commandes de vol électriques.
Décrire une procédure de conception des actionneurs électromécaniques de l'élaboration du cahier à l'utilisation des méthodes d'optimisation
Conclure sur les modèles à élaborer

Auteurs :

Yvan LEFEVRE
Carole HENAUX
Frédéric MESSINE
Bertrand NOGAREDE

Nom du projet : SIMPA2 - C6E2 Lot WP2

Sommaire

Introduction

Première partie : Actionneurs électromécaniques dans les commandes de vol électriques
Les commandes de vol électriques
- Les technologies proposées
- Les avantages attendus
- Les problèmes attendus
- Surfaces de commande de vol

Les systèmes d'actionnement électriques
- Actionneurs Electro Mécaniques (EMA)
- Actionneurs Electro-Hydraulique (EHA)
- Figure comparant EHA – ESPA/IAP
- Figure comparant EHA - EMA
- Tableau comparant les différents systèmes d'actionnement

Actionneurs électriques pour l'entraînement à vitesse variable
- Moteurs à courant continu
- Moteurs asynchrones
- Moteurs à reluctance variable
- Moteur synchrone à inducteur bobiné.
- Moteur synchrone à aimants permanents autopilotés
- Conclusion
  - Tableau comparatifs des différents moteurs
  - Domaine de faisabilité des différents moteurs
  - Tableau comparatifs des actionneurs pour les commandes de vol

Applications des moteurs électriques dans les commandes de vol
- Exemples d'utilisation de moteurs asynchrones
- Exemples d'utilisation de moteur à reluctance variable
- Exemple d'utilisation des moteurs à aimants permanents
- Conclusion

Deuxième partie : Modélisation et conception des actionneurs électromécaniques
Introduction
Cahier des charges
Procédure classique de conception d'un actionneur
- Choix des types, des structures et des configurations d'actionneur
- Dimensionnement par des modèles analytiques
- Caractérisation par des modèles numériques

Apport des méthodes d'optimisation
- Méthodes locales d'optimisation et modèles analytiques
- Méthodes locales d'optimisation et modèles numériques

Conclusion

Références

Introduction

L'Avion tout électrique est un concept qui a émergé dans les années dans les années 1970. Ce concept offre la possibilité d'une reconfiguration complète d'un avion. Les études ont montré que ce concept à terme peut conduire à une réduction de la masse totale, à une augmentation de la fiabilité, à la simplification de la maintenance, à la réduction des coûts de fonctionnement et à une augmentation de la sécurité.

Le but principal de ce concept est à terme d'éliminer toute l'infrastructure hydraulique et mécanique pour la distribution de l'énergie dans un aéronef permettant ainsi d'optimiser les moteurs uniquement pour la poussée et la production d'énergie électrique.

Une étape importante vers l'avion tout électrique est le concept d'avion plus électrique qui contient certaines mais pas toutes les caractéristiques d'un avion tout électrique.

Les principaux avantages attendus de l'utilisation progressive de l'énergie électrique dans l'aéronautique sont essentiellement une réduction de la masse totale et une augmentation de l'efficacité énergétique. Le problème principal de cette substitution est de garantir un niveau de sécurité compatible avec les exigences de l'aéronautique civile.

Ce rapport comporte deux parties. Une première partie permet de faire le point sur les enjeux de l'utilisation des actionneurs électromécaniques dans les commandes de vol. Une deuxième partie porte sur le problème de la conception des actionneurs électromécaniques dans un système embarqués.

Dans la première partie les technologies préconisées pour les commandes de vol électriques sont d'abord présentés. Ensuite, les différents systèmes d'actionnement électriques sont analysés. Enfin, les différentes motorisations électriques possibles actuellement sont comparées. L'analyse des travaux de recherche récents va permettre de dégager les besoins en modélisation et en conception des actionneurs électromécaniques.

Dans la deuxième partie, la procédure de conception classique d'un actionneur électromécanique est rappelée. L'élaboration du cahier des charges d'un actionneur est analysée comme une collaboration entre le concepteur d'un système et le concepteur d'un composant. Les différentes étapes d'une procédure de conception sont ensuite étudiées. Enfin l'apport des méthodes d'optimisation est considéré.

Les commandes de vol électriques

Les technologies proposées

Le concept d'avion plus électrique englobe deux domaines technologiques : fly by-wire (FBW) et power by wire (PBW).
La technologie FBW comprend la conception, le développement et l'implémentation de l'électronique pour les commandes de vol. L'électronique permet de développer un système de contrôle de vol et de commande d'actionneurs suivant une architecture centralisé ou distribué. Une architecture distribuée réduit la charge du calculateur central et permet une meilleure flexibilité. Cette architecture permet aussi de réduire la masse totale du réseau en réduisant le nombre de connexions et de composants. Cette technologie est actuellement arrivée à maturité et utilisée dans les avions de ligne comme l'A320 [1][2].
La technologie PBW propose la conception et le développement de dispositifs utilisant l'énergie électrique pour actionner les surfaces de commande de vol. Ceci inclut l'application et l'adaptation des technologies de commande de moteur électrique aux performances ainsi qu'à des spécifications particulières concernant la fiabilité, l'environnement et la sécurité requises pour les commandes de vol [3].
Des configurations d'actionneurs, de moteurs à haute efficacité énergétique and d'alimentations électroniques de fortes puissances ont été déjà développés et testés en vol notamment sur des avions de chasse mais ne sont pas encore certifiés pour pouvoir être installés sur des avions civils [3].

Les avantages attendus

Beaucoup de développements futurs sont encore à faire et sont motivés par le fait que l'utilisation des actionneurs électriques va permettre :

- la simplification de la maintenance par la réduction des composants hydrauliques ;
- la réduction des pièces et des outils de maintenance ;
- l'amélioration du diagnostic en temps réel ;
- l'amélioration de la disponibilité et de la fiabilité.

La distribution de l'énergie électrique est plus simple et permet plus de flexibilité pour reconfigurer le système de commande de vol. Les MTBF sont améliorés grâce à la facilité de délestage des actionneurs défectueux et de la mise en route des actionneurs électriques plus disponibles. La tolérance aux pannes est améliorée par le concept de « dissimilarité » (hybridation) des sources d'énergie et des actionneurs. La réduction de la masse totale est acquise en remplaçant certains systèmes hydrauliques par des systèmes électriques [2].

Les problèmes attendus

Le développement et l'adaptation des actionneurs électriques pour la commande de vol posent un certain nombre de problèmes aux concepteurs de moteur. Les sources d'énergie électrique ont une puissance massique plus faible que les sources d'énergie hydraulique. Ceci est moins important pour des applications nécessitant moins de 2kW. Au-dessus de 2kW le volume d'un générateur électrique peut doubler par rapport à son équivalent hydraulique.
Les actionneurs électriques modifient défavorablement l'environnement thermique dans un avion du fait de l'accroissement des sources de chaleur localisées et la réduction du pouvoir de dissipation ou d'évacuation thermique. Avec l'accroissement des utilisateurs d'énergie électrique, il sera plus difficile de maintenir la qualité de l'énergie à un niveau satisfaisant. Les convertisseurs statiques notamment produisent des distorsions dans les courants ou les tensions d'alimentation.

Pour résoudre ces problèmes, il faut examiner les avantages et les inconvénients des différents systèmes d'actionnement électrique vis-à-vis de la sécurité, des performances, de la fiabilité et des coûts. Actuellement il existe deux principaux systèmes d'actionnement : EMA et EHA.

Surfaces de commande de vol

Actuellement, les avions de ligne civils utilisent l'électricité pour commander les actionneurs hydrauliques. Dans le concept d'avion plus électrique, les prochaines générations d'avions civiles embarqueront des actionneurs électriques associés à des actionneurs hydrauliques classiques. Puis, progressivement, ces actionneurs hydrauliques seront remplacés par des actionneurs électriques [2].

Pour permettre cette évolution, différents progrès ont été faits ces dernières années et dont certains sont à confirmer :

- la fiabilité et les performances des générateurs électriques ;
- la tenue thermique de matériaux comme les isolants, les aimants permanents ;
- la qualité des réseaux électriques embarqués.

Au niveau des actionneurs électriques de progrès importants ont été faits. Mais il faut les poursuivre notamment dans la conception et la modélisation des réseaux embarqués, des actionneurs électriques et des alimentations par électronique de puissance. Ceci permettra de minimiser leur échauffement, améliorer leur tenue en température, augmenter leur compatibilité électromagnétique et leur tolérance aux pannes.

Au niveau des commandes de vol, les actionneurs électriques sont potentiellement capables d'actionner les surfaces suivantes :

- le ou les gouvernails de direction (rudders);
- les gouvernes de profondeur (elevators);
- les plans horizontaux réglables (trimmable horizontal stabilizer) ;
- les ailerons ;
- les volets (Flaps) ou les becs (slats);

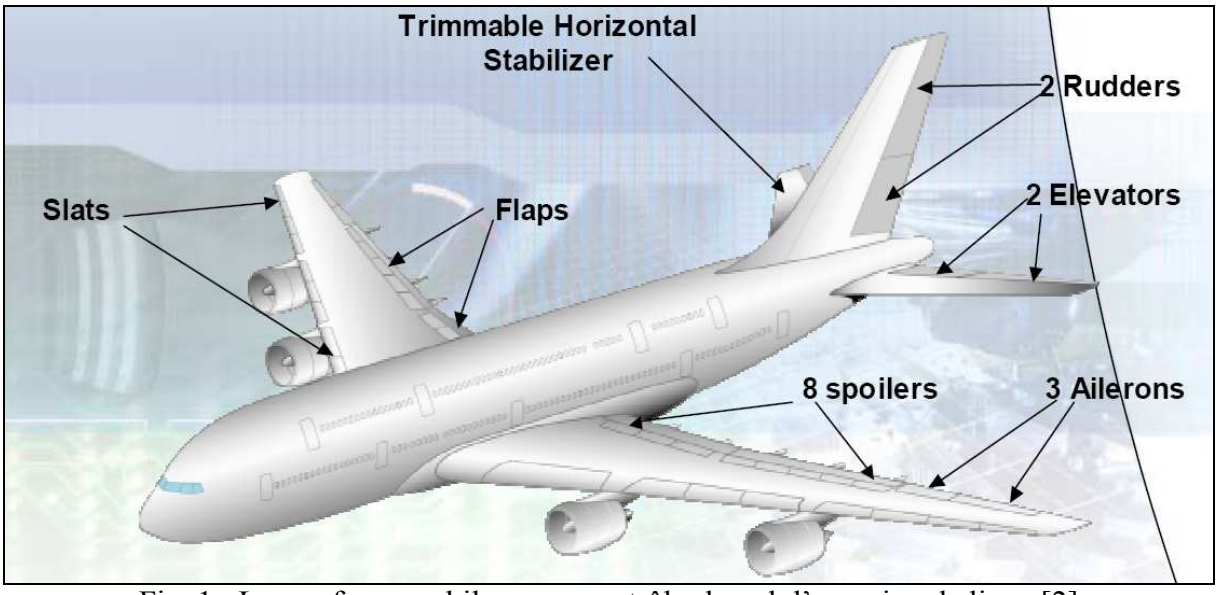

Fig. 1 : Les surfaces mobiles pour contrôler le vol d'un avion de ligne [2]

Les systèmes d'actionnement électriques

La plupart des avions civiles actuels fonctionnent avec des actionneurs hydrauliques commandés électriquement de technologie FBW (Fly By Wire). Pour la technologie PBW (Power By Wire), deux principales familles d'actionneurs électriques sont actuellement envisagées :

- les EHA : les actionneurs électro-hydrauliques ;
- les EMA : les actionneurs électromécaniques.

Les EMA sont potentiellement plus intéressantes que les EHA car ils ne comportent pas de systèmes hydrauliques. Cependant, les EHA sont les actionneurs électriques les mieux adaptés aux architectures actuelles des avions de lignes qui mixent systèmes électriques et hydrauliques.
L'état de l'art actuel est l'utilisation de la technologie Fly by Wire avec essentiellement des actionneurs hydrauliques commandés électriquement (Fig. 2). Dans l'approche d'avion plus électrique on passe progressivement vers le concept Power By Wire utilisant la structure EHA (Fig. 3) en passant par l'utilisation de la structure EBHA (Electrical Back-up Hydraulic Actuator) où l'actionneur électrique est en secours (Fig. 4) et l'actionneur principal reste un actionneur hydraulique.

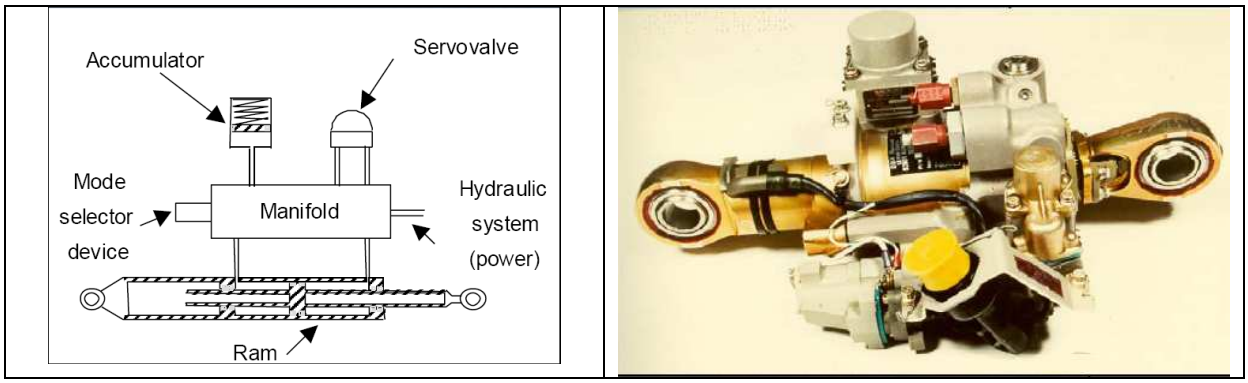

Fig. 2 : Schéma de principe et photographie d'un actionneur hydraulique classique [2]

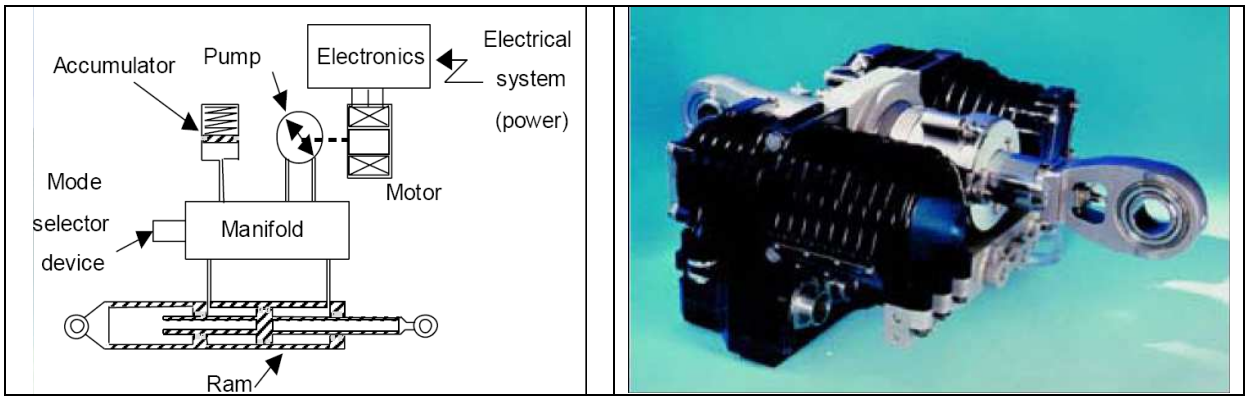

Fig. 3 : Schéma de principe et photographie d'actionneur électro-hydraulique (EHA) [2]

L'utilisation des EHA de manière définitif passe par une phase de standardisation.

L'utilisation des EMA va être plus lente car il faut modifier complètement l'architecture du système de commande de vol pour profiter pleinement de leurs avantages. De plus, les EMA présentent des risques sécuritaires beaucoup plus importants que les EHA.

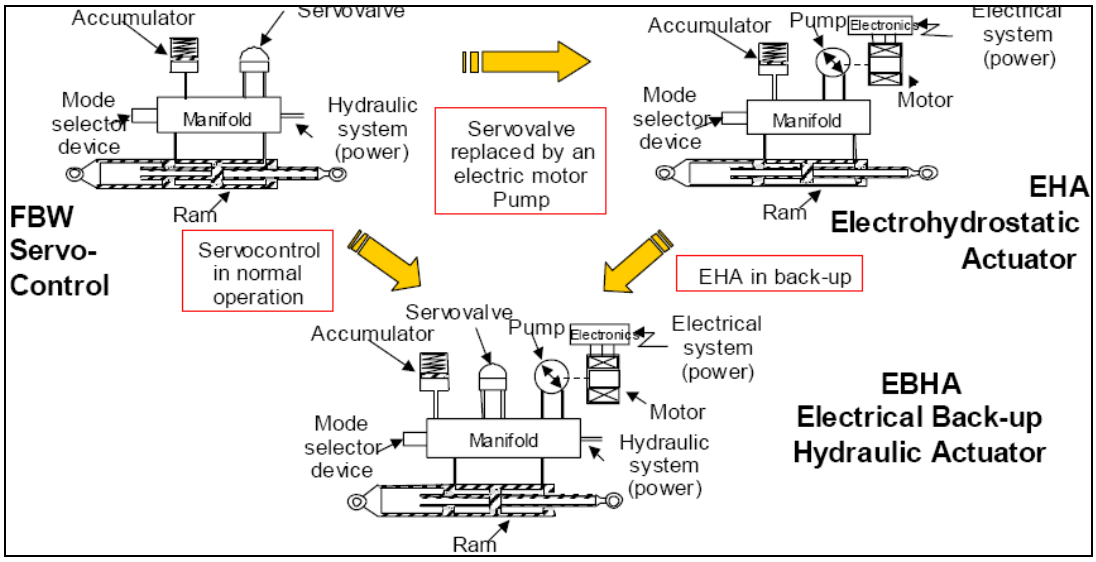

Fig. 4 : Problématique du passage progressif de FBW à PBW en utilisant des EBHA avant les EHA [2]

Actionneurs Electro Mécaniques (EMA)

Les EMA utilisent un embrayage mécanique pour actionner une surface de commande de vol. Ceci est réalisé grâce à une boîte de vitesse (gearbox) et, selon la méthode d'actionnement, on peut associer une vis à bille (ballscrew) pour produire une translation. On utilise des entraînements électriques à vitesse variable composé d'un moteur électrique et d'un convertisseur statique (Fig. 5). Ils peuvent fonctionner directement à partir d'une source de tension continue ou, moyennant un redresseur, à partir d'une source de tension alternative.

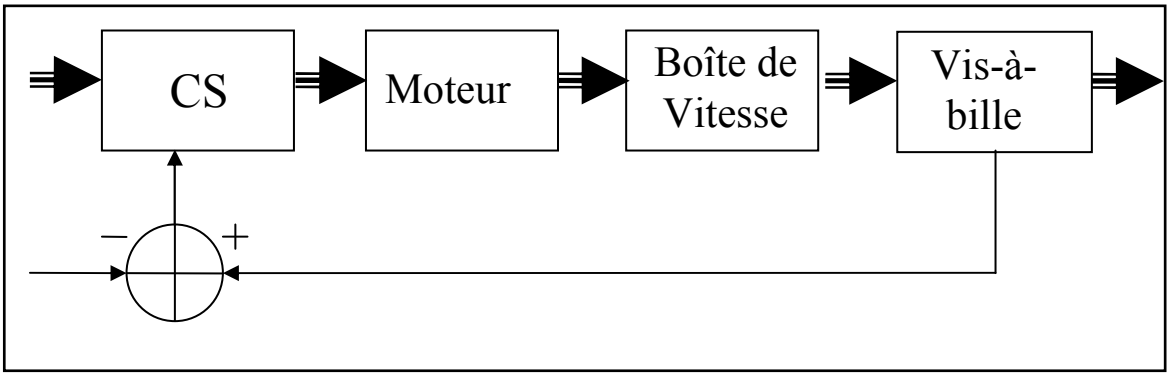

Fig. 5 : Schéma de principe d'un EMA (CS : Convertisseur statique d'alimentation)

Un EMA peut subir un défaut mécanique, risque de grippage mécanique, qui bloque tout son mécanisme et qui peut ainsi entraîner des problèmes mettant en danger la sécurité de l'avion lui-même. On peut ajouter des mécanismes pour réduire les conséquences d'un défaut mécanique mais cela entraîne un surplus de masse. C'est pourquoi, dans l'état actuel de la technologie, on n'envisage pas d'utiliser les EMA pour les commandes de vol primaire. Cependant, ils peuvent être appliqués à certain commandes de vol secondaire.

Contrairement aux EMA, la transmission de la puissance mécanique dans un EHA se fait à l'aide d'un système hydraulique. La figure 7 montre le schéma de principe d'un EHA.

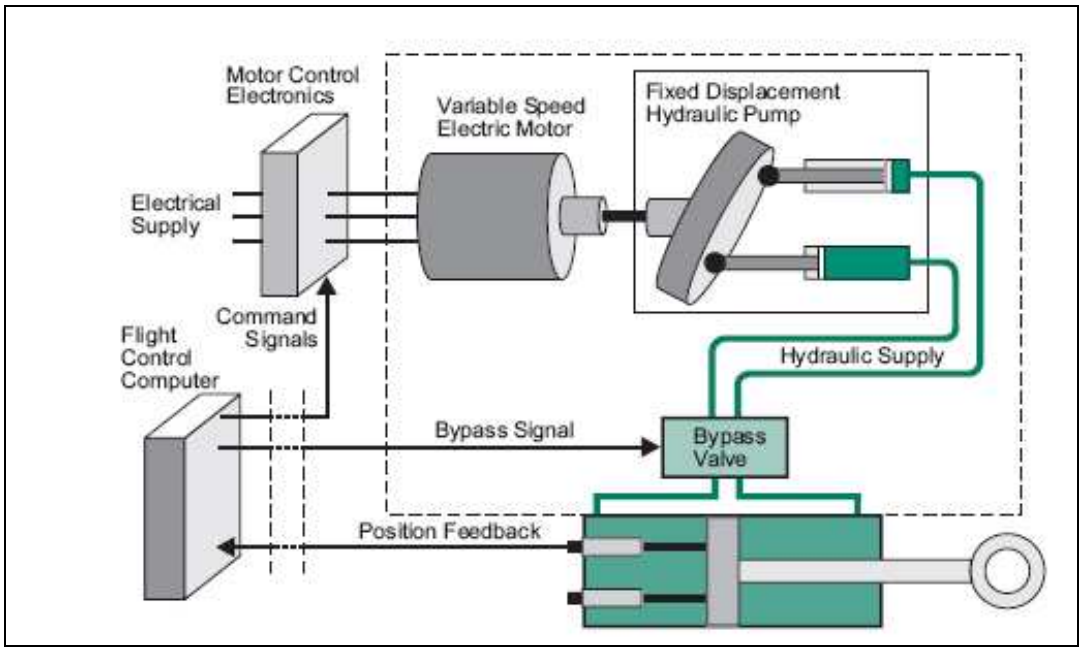

Fig. 7 : Schéma de principe d'un EHA [3]

Certains équipementiers ont créé une variante de l'EHA appelée ESAP (Electrohydraulic Servopump Actuator) comme l'IAP^{TM}, Integrated Actuator Package, une marque déposée par TRW. Cette structure est basée sur les mêmes composants qu'un EHA sauf que le moteur tourne toujours dans le même sens avec une vitesse de rotation constante. Un mécanisme indépendant est utilisé pour changer le sens d'écoulement du fluide. Cette structure évite l'utilisation d'une alimentation électronique sophistiquée pour alimenter le moteur. Un simple moteur asynchrone directement relié sur le réseau est parfaitement adapté à une telle structure (Fig. 8). La figure 9 montre la différence entre un EHA et un IAP. Le tableau 8 résume les caractéristiques des différentes structures d'actionnement possible et explique l'effort actuel de recherche pour développer les EMA notamment pour réduire leur vulnérabilité aux pannes. Enfin, la figure 10 compare les structures d'un EHA et d'un EMA.

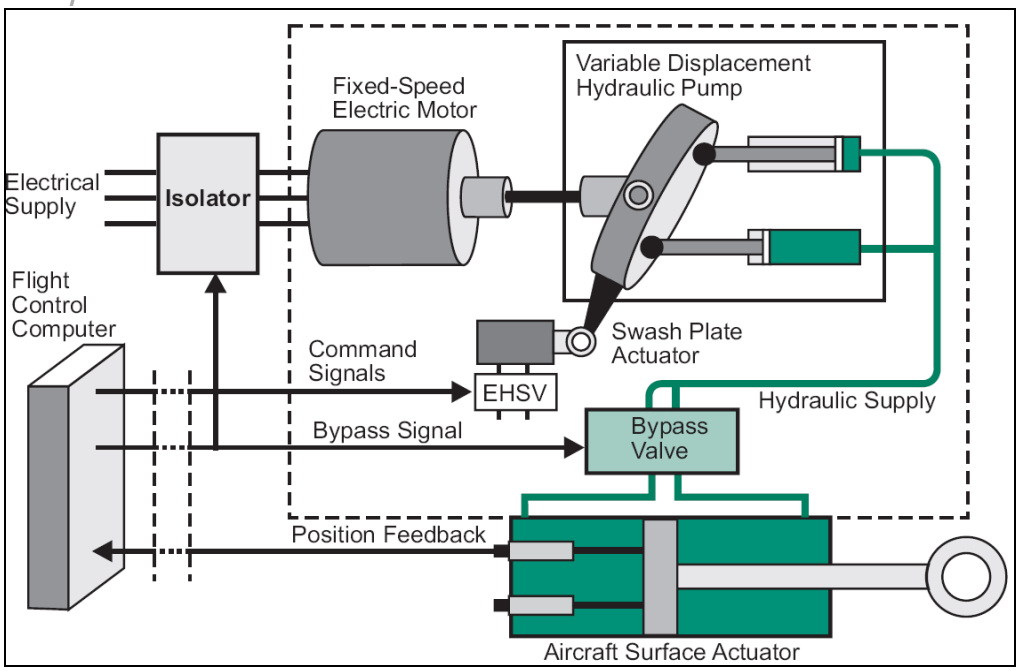

Fig. 8 : Schéma de principe d'IAP [3]

	Actionneur hydraulique classique	EHA	EMA/ESPA ou IAP
Vitesse et Accélération	Moyen	Moyen	Très élevé
Rendement	<50%	50 – 70%	>90%
Positionnement et contrôle	Difficile	Difficile	Facile
Maintenance	Beaucoup	Beaucoup	Peu
Encombrement	Beaucoup	Moyen	Peu
Impact sur l'environnement	Fuite d'huile	Fuite d'huile	Négligeable
Durée de vie	Selon l'effort de maintenance	Selon l'effort de maintenance	Longue
Tolérance aux pannes	Très tolérant	Peu tolérant	Peu tolérant

Tableau 1 : Caractéristiques comparées des structures d'actuation envisagées

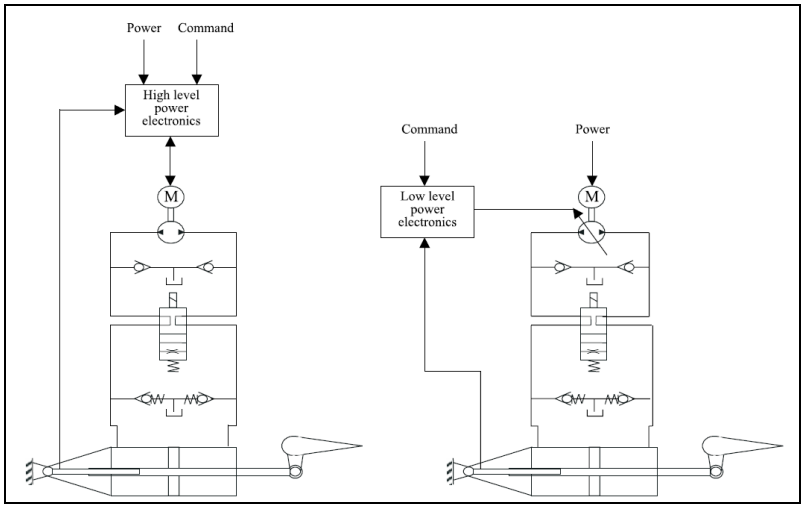

Fig. 9 : Comparaison entre un EHA et un IAP [5]

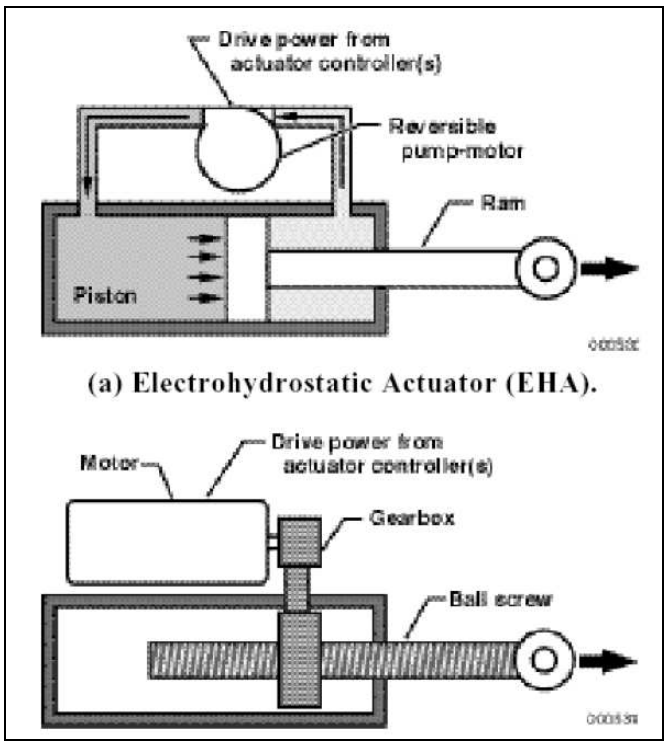

Fig. 10 : Comparaison des structures EHA et EMA [4]

Actionneurs électriques pour l'entraînement à vitesse variable

Dans les actionnements électriques, l'organe principal est un moteur électrique généralement associé à une alimentation électronique et un dispositif de commande électronique. Ces moteurs sont utilisés depuis plus d'une centaine d'années dans des applications industrielles très diverses. Pour faire le choix des moteurs électriques dans les systèmes embarqués pour l'aéronautique, nous allons examiner leurs caractéristiques spécifiques avec le recul et l'expérience ainsi accumulée.

Les moteurs les plus utilisés pour les applications industrielles nécessitant un entraînement électromécanique à vitesse variable sont :

- les moteurs à courant continu ;
- les moteurs asynchrones ;
- les moteurs à reluctance variable ;
- les moteurs synchrones à rotor bobiné ;
- les moteurs synchrones à aimants permanents

Moteurs à courant continu

Ce sont les moteurs à courant continu qui ont été les plus utilisés pour les applications nécessitant un entraînement électromécanique à vitesse variable en raison de la qualité d'entraînement qu'ils offrent et leur coût de reviens initial très bas.

Le couple est produit par l'interaction d'un champ inducteur et un champ induit en quadrature : les deux champs sont tout le temps déphasés d'un angle constant réglable de manière à produire le couple par ampère maximal. Le champ inducteur est produit par les enroulements fixes du stator. Le champ induit est produit par les enroulements mobiles du rotor (Fig. 11 et Fig. 12). Pour garder un déphasage constant entre les deux champs on utilise un commutateur électromécanique constitué d'un collecteur et de balais (brush en anglais). Les deux armatures sont alimentées par des courants continus. L'inducteur peut-être remplacé par des aimants.

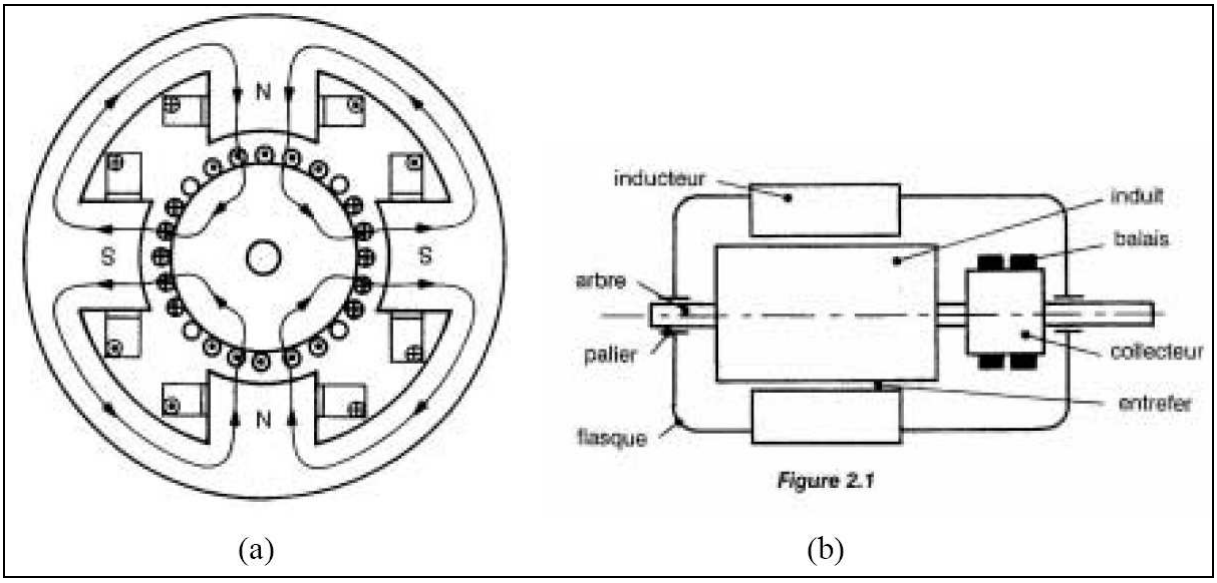

Fig. 11 : Schéma de principe d'un moteur à courant continu [6]:
coupe transversale (a) et coupe longitudinale (b)

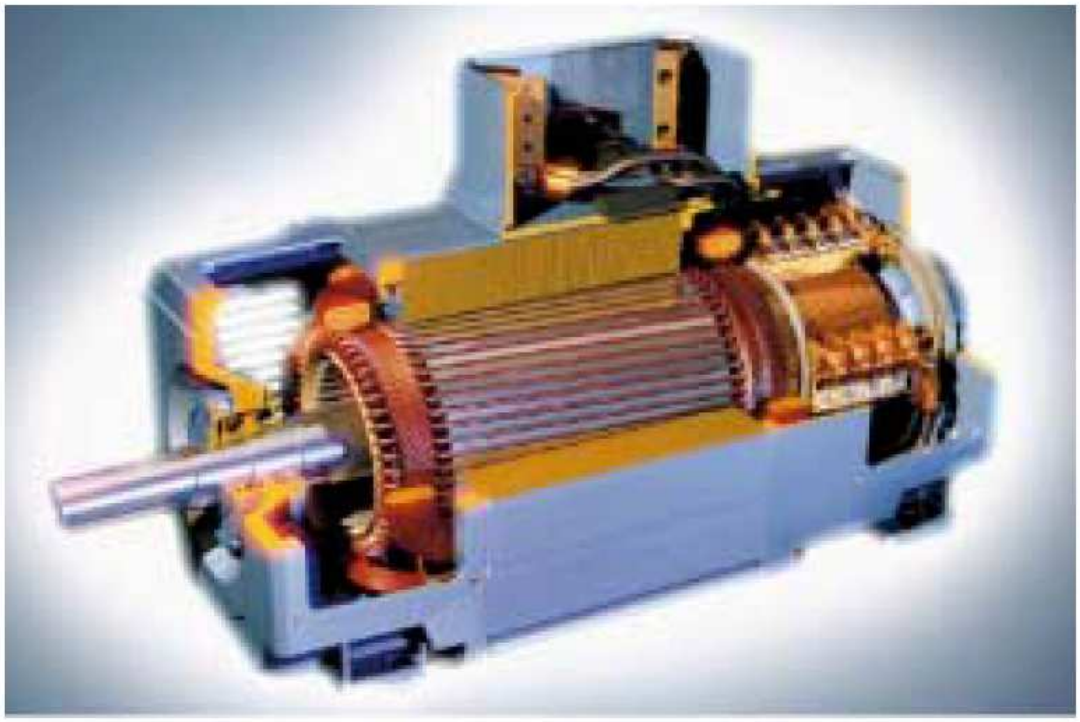

Fig. 12 : Photographie montrant la structure d'un moteur à courant continu de ABB [6]

Référence	Puissance (kW)	Vitesse nominale (tr/min)	Puissance massique (kW/kg)	Rendement %	Application
Leeson S56C	0.186	1750	0.017	76	Antidéflagrant
PARVEX RX630E	1.96	2400	0.105	92.	Servomoteur
Technologies-Inc ADT5-1050	2.67	3000	0.272	80	Servomoteur
MC235	30	2090	0.176	90	Traction
Leeson 519A	92	3600	-	-	Pompe
Robicon GH250X ASI	1220	1500	0.192	-	traction

Tableau 2: Moteurs à courant continu pour des applications industrielles [6]

Le réglage de la vitesse est très simple et dans les applications à vitesse variable, ce moteur constitue la solution économiquement optimale compte tenu de la simplicité de son alimentation et de sa commande électroniques.
Les principaux inconvénients du moteur à courant continu sont dus à son commutateur électromécanique. Le collecteur limite la vitesse du moteur par rapport aux autres moteurs. L'usure de celui-ci et des balais doit être limité par un entretien régulier. En général, un moteur à courant continu est plus lourd et plus encombrant que les autres moteurs de performances équivalentes. Les progrès en électronique de puissance ont permis de munir les

autres moteurs d'un commutateur électronique sans balais (brushless) beaucoup plus souple et nécessitant moins de maintenance, permettant ainsi un couple massique plus important et une fiabilité améliorée. Le tableau 1 donne les performances de quelques moteurs industriels existants.

Moteurs asynchrones

Le moteur asynchrone est le plus utilisé de tous les moteurs à courants alternatifs en raison de sa réputation de solidité et de robustesse ainsi que de son coût de reviens relativement modéré.

Les enroulements polyphasés du stator produisent un champ tournant. Les courants dans les enroulements mobiles du rotor sont produits par induction électromagnétique. Ces courants à leur tour produisent un champ tournant. Pour produire un couple, il faut que ces deux champs soient au synchronisme et tourne avec un déphasage constant. Pour cela le rotor tourne à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme.

Le rotor peut être bobiné. Dans ce cas il est constitué d'enroulements polyphasés court-circuités posés dans les encoches d'un empilage de tôles ferromagnétiques. Il peut être aussi à cage. Les enroulements sont alors remplacés par des barres d'aluminium ou de cuivre reliés mécaniquement et électriquement à leurs extrémités par deux anneaux (Fig. 13 et Fig. 14).

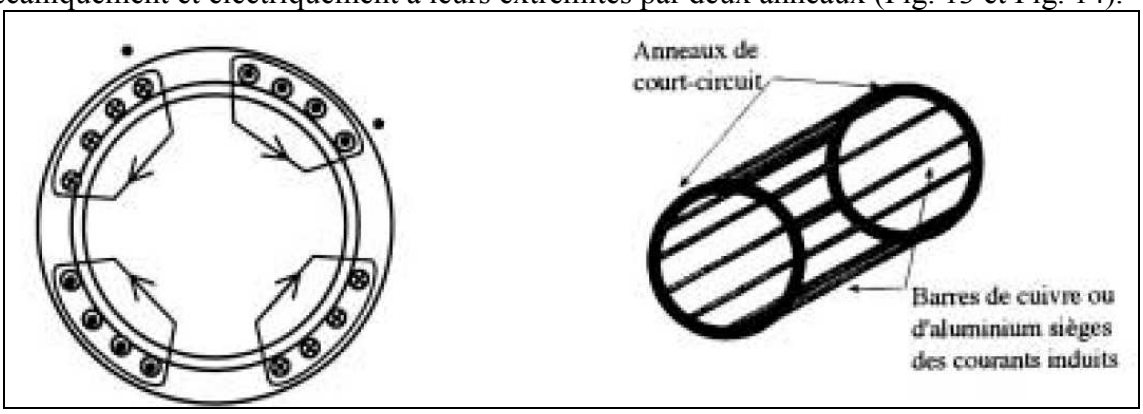

Fig. 13 : Moteur asynchrone et cage d'un rotor [6]

Fig. 14 : Photographie d'un moteur asynchrone à rotor bobiné [6]

La gamme de puissance des moteurs asynchrones varient de quelques kW à quelques MW. Les progrès importants en électronique de puissance et électronique de commande a permis son développement pour les entraînements à vitesse variable. Les moteurs asynchrones (MA)

notamment ceux à cage se sont imposés dans les applications industrielles nécessitant un entraînement électromécanique à vitesse variable. Ils sont considérés comme robustes, bon marché et nécessitant très peu de maintenance.
Le principal inconvénient des MA est qu'il est impossible d'éliminer complètement les pertes au rotor. Ceci contribue à baisser le rendement global du moteur. En particulier, les petits moteurs ont un rendement et un facteur de puissance très faibles. De plus pour ces moteurs, la complexité de la commande et le coût des alimentations électroniques sont des inconvénients, en particulier quand des performances dynamiques, de haut rendement et une large plage de vitesse sont nécessaires.
Compte-tenu des problèmes de tolérance aux fautes les développements récents concernent les machines asynchrones avec un nombre de phases supérieur à trois. Ceci augmente les performances et permet de mieux gérer les pannes du moteur mais complique encore plus la commande et l'alimentation électronique [8][9][10].
Le tableau 3 illustre les performances de quelques moteurs asynchrones.

Référence	Puissance (kW)	Vitesse nominale (tr/min)	Puissance massique (kW/kg)	Rendement %	Application
Leroy-Sommer FLSOL	0.55	1410	0.025	69.2	général
Leroy-Somer	6	2845	0.075	72	Levage
Leroy-Sommer LS160M	15	1430	0.148	87	Levage
Lenze 9332	75	300	0.117	92.9	Equipement
Cantoni SF3115XK2	160	2972	0.117	92.9	Ventilateur
Cantoni SH560H4C	2000	1495	0.223	97.9	Pompe

Tableau 3: Moteurs asynchrones pour des applications industrielles [6]

Moteurs à reluctance variable

Le principe des moteurs à reluctance variable repose sur le fait qu'un corps ferromagnétique se polarise magnétiquement dans un champ magnétique d'origine extérieur. Le corps polarisé se comporte alors comme un aimant tant que le champ magnétique persiste.
Dans un moteur à reluctance variable (MRV), le champ magnétique externe est généré par un stator comportant un bobinage polyphasé. Le corps ferromagnétique en constitue le rotor. Il est fait d'un empilement de tôles ferromagnétiques formant une structure dentée dont l'ordre de symétrie est différent de celle du stator (Fig. 15 et Fig. 16).

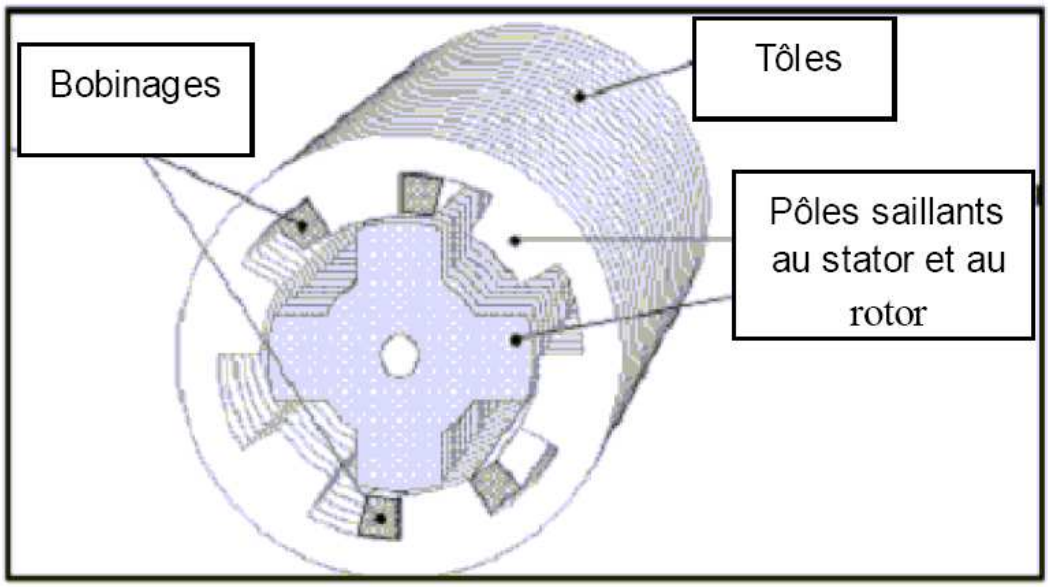

Fig. 15 : Moteur à reluctance variable double saillance de type 6/4 [6]

Les avantages du MRV sont dus à sa construction simple, en particulier du fait que son rotor ne comporte ni de bobinage ni d'aimants, son coût de reviens et son coût de maintenance faibles, un rapport couple inertie très élevé, son couple élevé à des vitesses modérées et un temps de réponse peu élevé. Il peut être appliqué dans des applications à entraînement direct avec toutefois une alimentation électronique plus complexe. Il a un rendement très élevé et du fait que son rotor ne comporte pas de bobinage l'évacuation des calories dues uniquement aux pertes joules des enroulements statoriques se fait beaucoup mieux que dans les moteurs où le rotor comporte des conducteurs ou des aimants permanents.
Le moteur à reluctance variable s'est surtout imposé dans le domaine des actionneurs pas à pas piloté en boucle ouverte. Son champ applicatif est vaste dans le domaine des petites puissances. Dans la gamme des moyennes puissances, il est surtout concerné par quelques applications en haute vitesse (conditionnement d'air, centrifugeuse, …).
L'inconvénient principal est la nécessité de polariser le rotor ce qui nécessite une puissance réactive élevé et détériore le facteur de puissance d'où un surdimensionnement du convertisseur statique d'alimentation.

Fig. 16 : Photographie des composants d'un MRV 6 /4

Le tableau 4 donne les performances de quelques MRV existant.

Référence	Puissance (kW)	Vitesse nominale (tr/min)	Puissance massique (kW/kg)	Rendement %	Application
Rocky-Mountain SR130S	0.46	15000	0.102	94.6	traction
Rocky-Mountain SR165L	8.42	15000	0.263	94.6	traction
Rocky-Mountain SR25L	17.89	15000	0.761	94	traction
Rocky Mountain	300	30000	-	92	alternateur

Tableau 4 : Exemples de MRV pour des applications industrielles [6]

Moteur synchrone à inducteur bobiné.

Le stator d'un moteur synchrone est le même que celui d'un moteur asynchrone. Le rotor est constitué d'un empilement de tôles ferromagnétiques qui supporte un bobinage alimenté par un courant continu. Les courants dans le bobinage statorique crée un champ tournant. Le champ tournant du rotor tourne au synchronisme et avec un déphasage constant par rapport à celui du stator. Comme ce champ est fixe par rapport au rotor, contrairement au cas du moteur asynchrone, le rotor tourne au synchronisme.

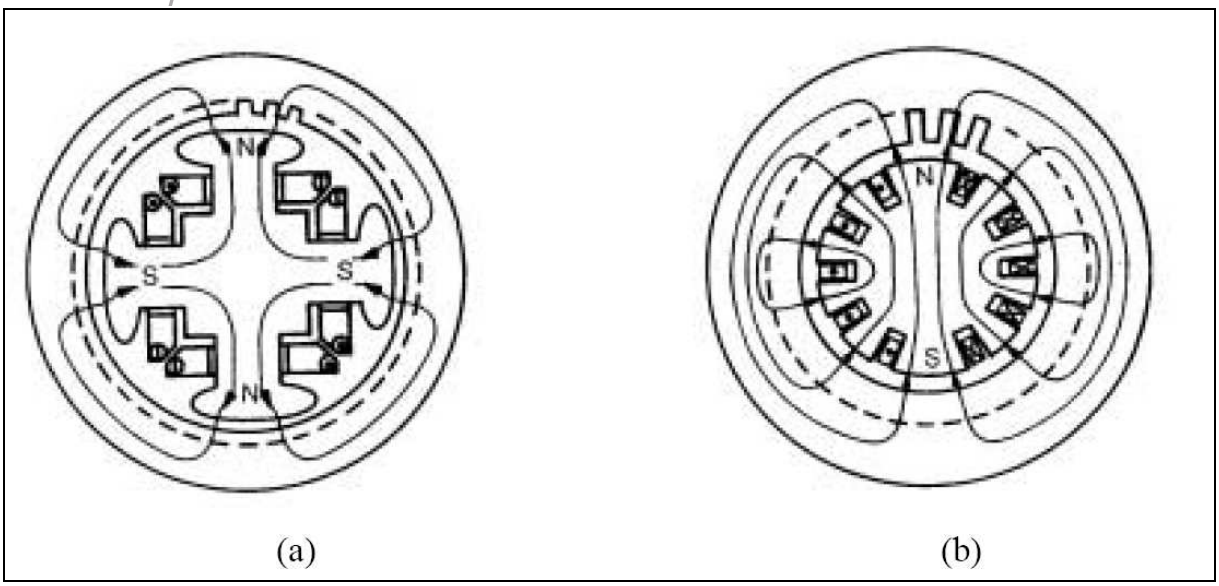

Fig. 17 : Moteurs synchrones à inducteur bobiné [6]
a) rotor à pôles saillants, b) rotor à pôles lisses

Référence	Puissance (kW)	Vitesse nominale (tr/min)	Puissance massique (kW/kg)	Rendement	Application
General Motors 55C4-32S-HDY	0.18	5000	0.128	71	Servomoteur
Parker Automation 190J8-150s	17.6	2400	0.129	85	Servomoteur
Parker Automation HWB40HF	74	8000	0.336	-	Usinage-grande vitesses
Leroy Sommer LS315	160	2976	0.195	95	Traction
Leroy-Sommer 512VL85	2160	1800	-	96.3	Alternateur
General Electric	1600MW	3600	-	-	Alternateur

Tableau 5 : Performances de moteurs synchrone à inducteur bobiné [6]

Pour le rotor deux configurations sont envisagées : un rotor à pôles saillants pour lequel les bobines inductrices sont montées autour de noyaux polaires massifs ou feuilletés, ou un rotor à pôles lisses pour lequel le bobinage est logé dans les encoches pratiquées dans la masse du rotor (Fig. 17). Le fait d'avoir un rotor bobiné offre la possibilité de régler le flux inducteur ce qui est atout formidable pour certaines applications comme la traction électrique notamment pour faire tourner le rotor au-delà de la vitesse nominale. Cependant, le rotor bobiné nécessite pour son alimentation un collecteur et des balais. Ceci nécessite comme pour le moteur à

courant continu un entretien régulier, augmente l'encombrement et diminue la puissance massique du moteur.
Les rotors à pôles lisses sont plutôt adaptés pour des applications à forte puissance et grande vitesse. La machine synchrone est surtout utilisée pour la génération d'électricité comme alternateur. Elle omniprésente dans les systèmes embarqués (groupe électrogènes). Le fonctionnement en moteur reste compétitif dans la gamme des hautes puissances et hautes vitesses (traction ferroviaire à grande vitesse, compresseurs).
Le tableau 5 donne quelques performances de moteurs synchrones à inducteur bobinés

Moteur synchrone à aimants permanents autopilotés

Dans ce type de moteur, le champ tournant du rotor interagissant avec le champ tournant statorique est produit par des aimants permanents.
Il est adapté à une gamme d'applications très vaste. Le rotor peut être à l'extérieur comme dans la majorité de ventilateurs motorisés par un moteur synchrone. La forme, la disposition et la polarisation des aimants permanents multiplient le nombre de structures possibles : moteurs à pôles lisses avec aimants montés en surface, moteurs avec aimantes enterrés ou moteurs à pôles saillants à concentration de flux.
Le moteur à aimants permanent est caractérisé par un rendement élevé et un couple massique très important d'où sa percée dans les systèmes embarqués.
Par opposition, aux moteurs à courant continu classique, on les appelle moteurs à courant continu sans balais, BrushLess DC (BLDC) en anglais.

Fig. 18 : Moteurs à aimants permanents pour des applications nécessitant des ondulations de couple très faible [6]

Le tableau 6 donne un aperçu des performances de quelques moteurs à aimants permanents existants.

Référence	Puissance (kW)	Vitesse nominale (tr/min)	Puissance massique (kW/kg)	Rendement %	application
Lenze MSD KS 036-13	0.25	4000	0.166	65	servomoteur
Imperial Electric 4BA01600	0.96	1800	0.044	66	équipement
Lenze MDF kS 071-33	5.9	3500	0.412	80	servomoteur
Lenze MDF Ks 112	20.3	3520	0.319	70	servomoteur

Tableau 6 : Performances de moteurs synchrones à aimants permanents [6]

Conclusion

Le tableau 7 résume les avantages, les inconvénients et les utilisations usuelles des différents moteurs électriques pour les entraînements à vitesse variable. La figure 19 donne les limites de faisabilité actuelles de ces différents moteurs.

Pour les applications aéronautiques le moteur à courant continu est rarement envisagé du fait de l'entretien que nécessite le collecteur et les balais ainsi que son encombrement plus important et une puissance massique plus faible que les autres moteur.

Pour les mêmes raisons, le moteur synchrone à inducteur bobiné est aussi rarement envisagé.

Le moteur asynchrone à cage ne nécessite pas d'alimentation électrique pour le rotor. Il est surtout envisagé dans les applications nécessitant une vitesse constante. Son principal inconvénient par rapport aux moteurs synchrones à aimants permanents et moteur à reluctance variable est dû aux pertes joules au rotor qui sont relativement difficile à évacuer.

Les moteurs les plus envisagés pour les applications aéronautiques notamment pour les commandes de vol sont les moteurs à aimants permanents et les moteurs à reluctance variable.

Le tableau 8 comparent les moteurs alternatifs les plus attendus dans les applications aéronautiques notamment pour les commandes de vol.

Type d'interaction	*Avantages*	*Inconvénients*	*Utilisations*
1. Courant produit / courant produit - Machine synchrone à rotor bobiné.	- plus facile à réaliser et plus robuste que la machine à C.C ; - son rendement est proche de 99% ; - possibilité de réglage du cosφ.	-un moteur auxiliaire de démarrage est souvent nécessaire ; -deux sources d'énergie sont nécessaires ; - problème d'accrochage et décrochage sur le réseau	- en forte puissance (1 à 100MW) ; -peut être utilisé comme source de puissance réactive pour relever le facteur de puissance.
- Machine à C.C à inducteur bobiné.	-très bien adapté au fonctionnement à vitesse variable ; -facile à mettre en oeuvre dans les quatre quadrants ; -fort couple de démarrage et démarrage rapide.	- son collecteur constitue l'élément limitatif pour les applications (haute tension et/ou forte courant, grande vitesse..) ; - pertes excessives dans le rotor et les balais ; - nécessité une source DC	- servomécanismes des machines-outils ; - entraînements de toute sorte ; - applications en traction électrique (des moteurs série).
2. Courant produit / courant induit -Machine asynchrone	- structure simple et robuste ; - son rapport coût / puissance est le plus faible ; - peut fonctionner en forte puissance à vitesse variable dans un large domaine.	- courant de démarrage très important ; - la réduction de vitesse se détriment du rendement ; - les pertes rotoriques posent un problème d'échauffement.	-électroménager sans réglage de tension par onduleur ; - en traction électrique (TGV, Tram) ; - des entraînements électriques économiques à deux vitesses.
3. Courant produit / aimantation produite -Machine à aimant permanent	- rendement élevé ; - fort couple massique ; - simple à commander ; - taux d'harmoniques bas.	- pertes par courants de Foucault dans les aimants ; - coût total plus cher.	-aux faibles puissances (appareil enregistreur, servomoteur). - en forte puissance (1à 2) MW, traction électrique (sous-marin), véhicule
4. Courant produit / aimanation induite -Machine à réluctance variable	-la plus simple et la plus économique ; - possibilité de travail en haute vitesse.	-couple à fortes ondulations ; - bruit acoustique élevée ; - mauvais facteur de puissance.	-dans l'électroménager ; - accessoires automobiles (moteur de traction) ; -dans les application de haute vitesse (starter /générateur à bord des avions).

Tableau 7 : Avantages, inconvénients et utilisations courantes des moteurs électriques [6]

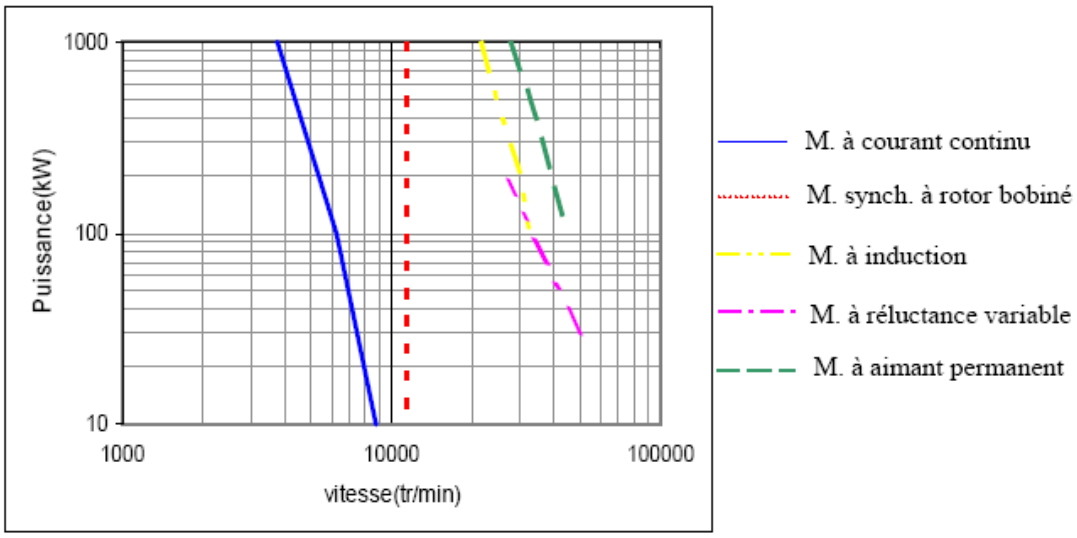

Fig. 19 : Limite de faisabilité des moteurs électriques

	MAS	BLDC	MRV
Robustesse et fiabilité	+	o	+
Rendement	-	+	+
Commande en Boucle ouverte	+	-	-
Simplicité de la commande en BF	o	+	+
Couple massique	o	+	+
Facteur de puissance (Encombrement alimentation électronique)	-	+	-
Qualité du couple (Ondulation)	+	+	-
Gamme de vitesse	+	+	+
Sans capteur	+	-	-
Bruit acoustique	o	+	-
Coût	+	-	+

Tableau 8 : Comparaison des moteurs asynchrones (MAS), des moteurs synchrones à aimants permanents (BLDC), des moteurs à reluctance variable (MRV)
+ : Avantages, - :Inconvénient, o : moyen

Applications des moteurs électriques dans les commandes de vol

Le concept d'avion plus électrique est un concept qui date des années 1970 et très tôt des recherches ont été effectués pour développer des systèmes d'actuation de type EHA ou EMA. Dans ces développements les chercheurs ont utilisés principalement des moteurs asynchrones, des moteurs à reluctance variable mais surtout des moteurs à aimants permanents.

Exemples d'utilisation de moteurs asynchrones

Dans les systèmes d'actuation de type ESPA ou IAP^{TM} les moteurs asynchrones sont les mieux adaptés car une vitesse de rotation constante est exigée. Ainsi Lucas Aerospace a développé dans les années 1980 un actionneur de direction d'un train d'atterrissage basé sur le concept IAP^{TM} et utilisant un moteur asynchrone. Dans les années 1990, le même concept a été développé pour l'actionnement des spoilers et des ailerons [7].
L'IAP contient un servo-pompe, avec un rendement et une fiabilité élevé, commandé par un moteur asynchrone qui tourne à vitesse constante. Le changement de direction et le positionnement sont obtenus à l'aide d'un plateau cyclique (Fig. 8 et 20)

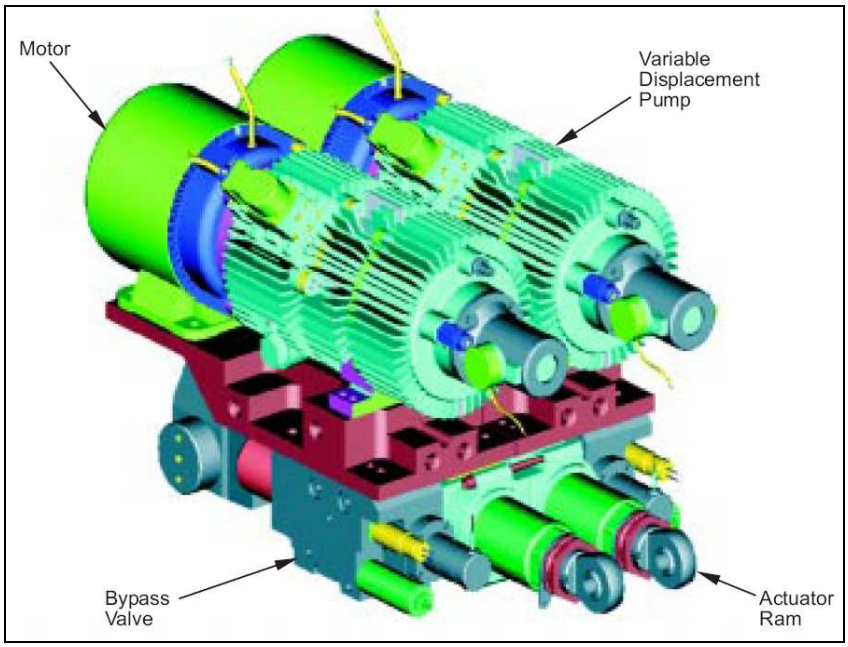

Fig. 20 : Illustration d'un IAP réalisé par TRW avec des moteurs asynchrones [3]

Ces systèmes ont été implantés sur des avions de transport militaire.
L'utilisation du concept IAP avec un moteur asynchrone directement alimenté par le réseau alternatif de l'avion offre les avantages suivants :

- l'échauffement du moteur dépend très peu de la charge ;
- un refroidissement forcé continu peut-être adapté si le moteur est tout le temps en marche ;
- on évite l'utilisation d'une alimentation électronique ce qui améliore la compatibilité électromagnétique du système.

Récemment il y a eu peu d'articles sur les moteurs asynchrones appliqués à l'avion plus électrique. Les recherches qui s'en rapprochent le plus, motivés notamment par des soucis de fiabilité et de rendement, portent sur la conception, l'alimentation et la commande des moteurs asynchrones multi-phasés à vitesse variable [8][9][10].

Exemples d'utilisation de moteur à reluctance variable

Des travaux de recherche effectués dans les années 1990, pour choisir le meilleur système d'actionnement électrique pour l'avion plus électrique ont montré que le moteur à reluctance variable est très intéressant [11][12][13][14].
Les caractéristiques principales des MRV sont :

- Tolérance naturelle aux pannes : chaque phase est relativement indépendant magnétiquement contrairement aux autres moteurs alternatifs, asynchrones ou synchrones ;
- Très peu de pertes au rotor : le rotor ne comportant ni bobinage ni d'aimants, peu de tête de bobine au stator ;
- Robustesse : le rotor est homogène, le stator est très facile à bobiné ;
- Coût de fabrication très faible : c'est le moteur dans le coût de fabrication est le plus faible ;
- Alimentation électronique relativement simple : la structure est très simple et utilise des composants standard, la fréquence de commutation est relativement basse ce qui réduit les pertes par commutation
- Puissance et couple massiques très élevés : il est très adapté aux applications nécessitant un couple massique élevé ;
- Principal inconvénient : c'est le bruit et les ondulations de couple.

L'élimination de ce dernier point constitue l'objet de nombreux travaux de recherche dans le monde.

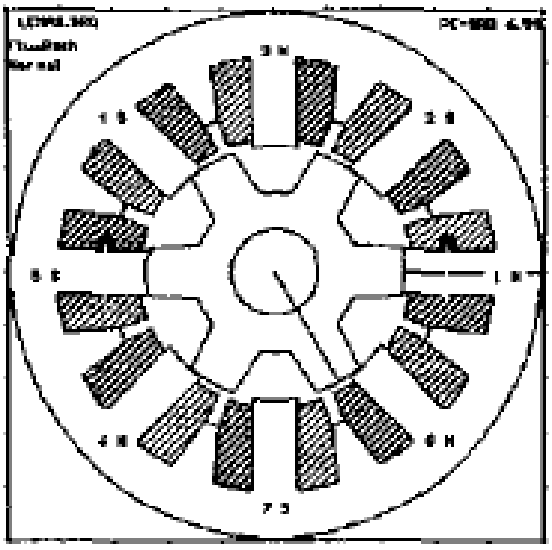

Fig. 21 : Structure d'un MRV 8/6 [15]

Des études de faisabilité de MRV pour des systèmes d'actuation de spoiler ont montré cependant que le point crucial de la conception du moteur a été la minimisation de l'échauffement du moteur en particulier lors des phases où le moteur doit délivrer un couple de maintien élevé pendant un temps relativement long. Ceci peut induire un surdimensionnement du volume et du poids du convertisseur statique d'alimentation. La modélisation thermique et les études de simulation du comportement dynamique détaillé semblent incontournables pour ce type de développement [15].

Dans la plupart des travaux de recherche, les MRV ont été implantés au sein d'un EMA malgré leur risque de blocage.

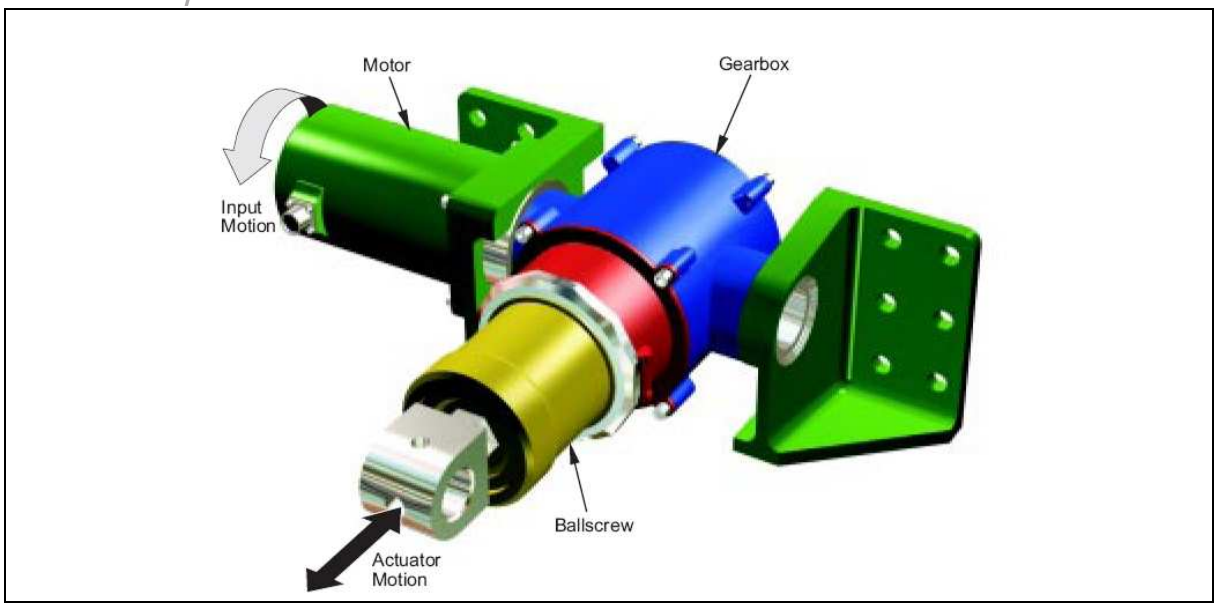

Fig. 22: EMA réalisé par TRW associé avec un moteur à reluctance variable [3]

Des travaux d'études et de recherches pour améliorer le comportement thermique des moteurs à reluctance variable sont toujours d'actualité notamment par l'utilisation des matériaux magnétiques composites [6].

Exemple d'utilisation des moteurs à aimants permanents

Les moteurs synchrones à aimants permanents sont les moteurs les plus envisagés pour être implantés dans des systèmes d'actuation en aéronautique.
Les travaux de recherche dans le cadre du programme Electrically Powered Actuator Design (EPAD) ont abouti à des moteurs implantés dans des EHA (Fig. 23) ou EMA (Fig. 22 et Fig. 24) et testés lors de vol d'avions militaires [16].

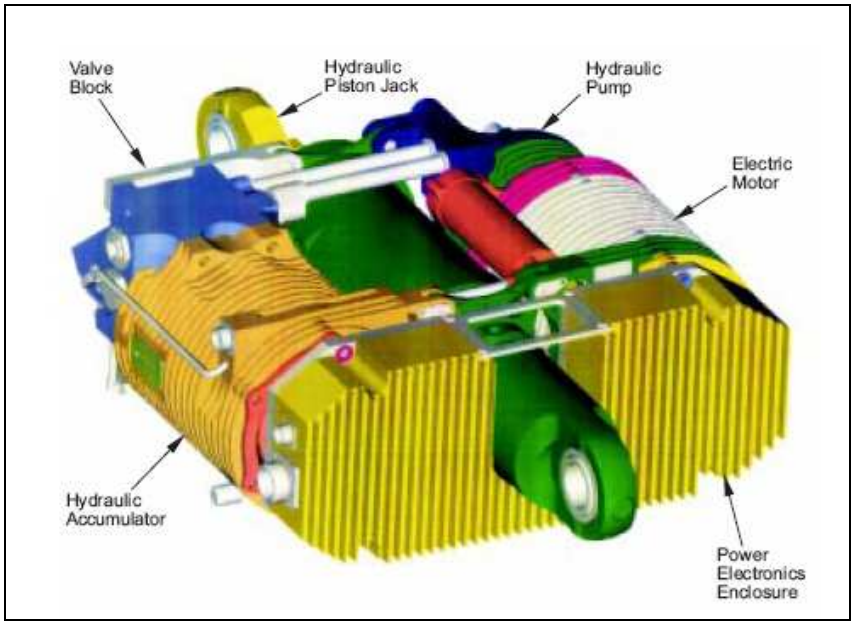

Fig. 23: Illustration d'un EHA réalisé par TRW associé à un moteur à aimants permanents [3]

Les moteurs à aimants permanents sont surtout intéressants pour leur couple et puissance massiques élevés ainsi qu'un rendement qui peut être aussi très élevé.
Des travaux de recherche ont montré que pour aboutir à un moteur qui satisfait au cahier des charges il fallait considérer les caractéristiques réelles des matériaux ainsi que les pertes dues à la commutation et les pertes dans les aimants [17]. Pour les différentes configurations de moteur considérées sur la figure 25, le tableau 9 donne leurs masses et leurs encombrements relatifs pour l'actionnement d'un spoiler d'un avion militaire avec une EMA (Fig 24). Les bobinages particuliers des moteurs de la figure 25 ont été adoptés pour rendre le MAP plus tolérant aux pannes [18].

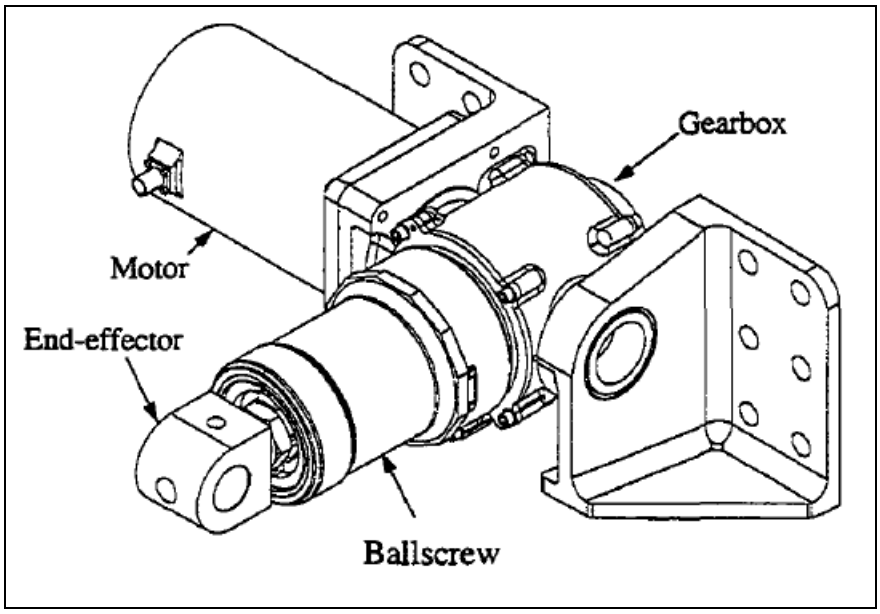

Fig. 24 Structure d'une EMA pour actionner un spoiler [17]

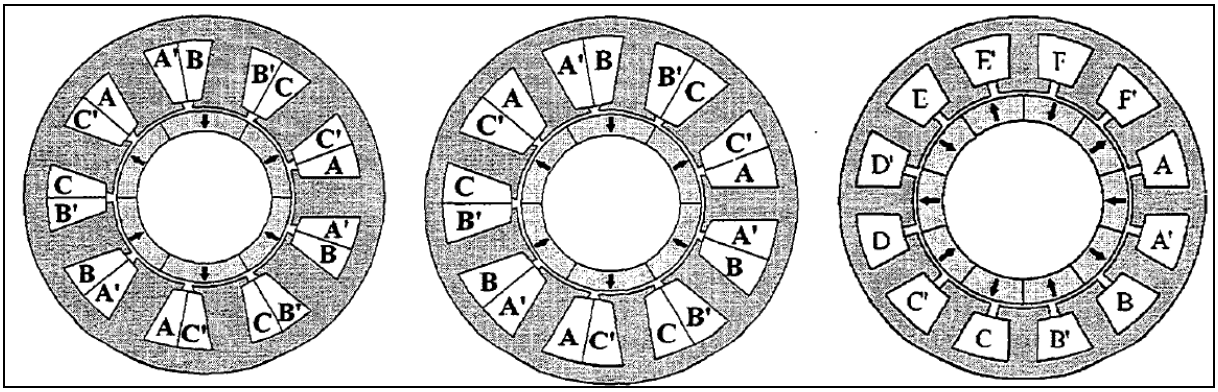

Fig. 25: Configurations envisagées pour un MAP implanté sur l'EMA (Fig 24)
A gauche moteur triphasé avec tôles en fer-silicium, au centre moteur triphasé avec tôle en acier-cobalt, à droite moteur hexaphasé avec tôle en acier-cobalt

	Triphasé	Triphasé	Hexaphasé
Type de tôle	Fer-silicum	Acier-cobalt	Acier-cobalt
Poids relatifs	1.12	1	1.02
Inertie du rotor	1.17	1	1.6
Diamètre d'alésage	1	1	0.89
Longueur effective des tôles	1.16	1	1.21

Tableau 9: Masse et encombrement relatifs des moteurs selon leurs configurations (Fig. 25)

Les travaux de recherche actuels sur les MAP portent surtout sur les configurations plus tolérantes aux pannes, l'analyse des différentes pertes dans un moteur à commutation électronique, les matériaux magnétiques améliorants la dissipation thermique et minimisant les pertes [19].

Conclusion

Des travaux de recherche ont montré la faisabilité de l'utilisation des moteurs à aimants permanents et des moteurs à reluctance variable.
Ils montrent aussi un léger avantage pour le moteur à reluctance variable compte-tenu essentiellement de sa tolérance naturelle aux pannes en raison notamment de l'indépendance des phases du moteur des uns par rapport aux autres. Toutefois, l'adaptation des moteurs à reluctance variable passe par un dimensionnement très pointu du convertisseur statique d'alimentation à l'aide de modèles prenant en compte de manière très fine l'échauffement dans le moteur et son dispositif d'alimentation.
La faisabilité des moteurs à aimants permanents passe par l'adoption d'une configuration (système de bobinage et matériaux spécifiques) plus tolérante aux pannes. Ces travaux soulignent l'importance de la modélisation des pertes, même dans les aimants, et de la modélisation thermique.
Ces points sont donc à prendre dans l'élaboration d'un logiciel d'aide à l'étude et à la conception d'actionneurs électromécaniques pour les commandes de vol.

Modélisation et conception des actionneurs électromécaniques

Pour concevoir un actionneur électromécanique différentes méthodologies sont possibles selon les moyens et l'expérience du concepteur. La conception d'un actionneur électromécanique est une démarche de synthèse qui est initiée par l'existence d'un cahier des charges et qui s'appuie sur des modèles représentant à divers niveaux les phénomènes électromécaniques et thermiques au sein de l'actionneur. Dans cet article, à la lumière de travaux récents publiés dans la littérature et en s'appuyant sur notre propre expérience dans le domaine de la modélisation et de la conception des moteurs autopilotés à aimants permanents, nous allons essayer de donner des éléments pour définir les enjeux de la conception des actionneurs électromécaniques.

Nous allons d'abord examiner la définition d'un cahier des charges et le processus classique de conception d'un actionneur. Pour cela, il faut prendre en compte le fait que les actionneurs électromécaniques interviennent dans un système dans laquelle la gestion de l'énergie, de l'échauffement et la répartition des masses sont importantes. Pour cela il faut faire coopérer les deux visions, systèmes et composants.

L'utilisation des méthodes d'optimisation rend caduque d'une certaine manière cette vision classique de la conception d'un actionneur électromécanique réservé jusqu'à présent à des spécialistes. Nous allons donc nous intéresser à l'apport des méthodes d'optimisation.

Enfin, avec la montée vertigineuse de la puissance des ordinateurs, il est maintenant possible d'utiliser des codes de calculs numériques de type éléments finis de manières très intensives dans l'étude et la conception actionneurs électromécaniques. Ceci offre la possibilité de les associer avec les méthodes d'optimisation pour avoir des modèles efficaces et robustes. Nous allons donc examiner l'intérêt d'une telle approche.

Cahier des charges

La démarche de conception d'un actionneur électromécanique est initiée par une demande formulée sous forme de spécifications dans un cahier des charges [20][21]. Pendant longtemps les concepteurs d'actionneurs ne se sont pas intéressés directement au processus d'élaboration d'un cahier des charges. Mais ils se sont aperçus que pour bien y répondre il fallait retoucher au cahier des charges dans la plupart des cas. Certains concepteurs considéraient cette modification du cahier des charges, pour l'adapter au mieux aux possibilités d'un actionneur, comme faisant partie intégralement de la démarche de conception [22]. De là est née la prise de conscience par le concepteur de la nécessité d'une démarche plus globale pour mieux définir le cahier des charges d'un actionneur. Il s'agit de prendre en compte l'environnement immédiat de l'actionneur et de définir une méthode qui permet d'optimiser les performances du système ou du sous-système auquel appartient l'actionneur.

Cette démarche doit être menée de concert par le concepteur du système et les spécialistes des différents composants. A notre sens, elle est source d'innovations à condition toutefois de ne pas définir a priori les différents composants (à partir de composants prédéfinis ou déjà existants) [23][24][25].

Une fois que l'architecture d'un système est définie, il faut procéder à sa conception, au choix des différents composants et à leurs dimensionnements. C'est à ce niveau que le cahier des charges de chaque composant peut-être défini par une démarche descendante et à l'aide de modèles. Les connaissances expertes du spécialiste du composant peuvent alors être utiles pour fournir au concepteur du système des modèles simplifiés spécifiques permettant d'optimiser les performances globales de l'ensemble. Selon le composant et les différents stades de la conception du système ce modèle peut être très grossier, représentant uniquement les échanges d'énergies ou de puissance, ou plus fins comme des modèles à constantes

localisées. En conclusion, le processus de définition du cahier des charges d'un actionneur électromécanique n'est pas très simple et se situe à l'interface de la vision système et composant.

Procédure classique de conception d'un actionneur

Compte-tenu de la diversité des domaines d'application, des efforts considérables ont été faits ces vingt dernières années pour développer les moteurs à aimants permanents. Si bien que dans les années 1990, la conception des moteurs à aimants permanents est devenue un classique. Le livre de J. R. Hendershot et TJE Miller [25] expose de manière détaillée les différentes étapes de la conception d'un moteur à aimants permanents. A partir de ce livre, on peut déterminer les différents types de modèles nécessaire dans une procédure de conception.

Pour un moteur à aimants permanent, les différentes étapes de la conception sont les suivants :
1 – Spécifications de l'application
2 – Configuration du moteur : entrefer radial (rotor intérieur ou extérieur) ou entrefer axial
3 – Sélection des types d'aimants permanents
4 – Sélection du nombre de pôles
5 – Sélection du nombre d'encoches stator et du nombre de phases
6 - Faire un dimensionnement rapide (estimation)
7 - Calcul de l'entrefer et de la reluctance magnétique
8 - Calcul des dimensions du rotor et du flux par pole
9 – Calcul des dimensions du stator
10 – Calcul du nombre de spires et de conducteurs
11 – Dimensions du bobinage, estimation de la résistance et de l'inductance de chaque phase
12 – Estimation des performances
13 – Modifier les dimensions jusqu'à ce que les performances soient atteintes

Choix des types, des structures et des configurations d'actionneur

Un cahiers des charges peut contenir jusqu'à 24 types de spécifications différentes allant des normes en vigueur jusqu'au niveau maximal de vibrations ou des types de protection souhaités en passant par la définition du type d'alimentation ou les caractéristiques de la charge mécanique :

1 – Normes nationales, internationales ou industrielles (US, EC)
2 – Puissance ou couple nominal (fonctionnement en continue)
3 – Puissance ou couple maximale (fonctionnement transitoire ou intermittent)
4 – Vitesse maximale
5 – Rotation horaire et/ou anti-horaire
6 – Fonctionnement moteur et freinage
7 – Niveau des tensions d'alimentation
8 – Fréquence des tensions d'alimentation
9 – Type de régulation : couple, vitesse, poistion
10 – Précision et bande-passante de la boucle fermée
11 – Programmable : profil des mouvements, rampe de démarrage et de freinage
12 – Spécification sur les 'accélérations' (démarrage plus ou moins douce)
13 – Interface RS232, IEEE488, control à distance – Spécifications face avant
14 – Spécifications dynamique : couple/inertie, accélération/décélérations
15 - Avec ou sans réducteur
16 – Caractéristiques du refroidissement : T° d'entrée et de sortie, débit air/huile/eau

17 – Caractéristiques de l'environnement : poussière, gaz, produits chimiques
18 – Niveau de bruit acoustique
19 - Niveau d'harmoniques, CEM
20 - Spécifications des garanties
21 - Maintenance et pièces détachées
22 - Manuel d'utilisation et de réparation ;
23 – Spécifications des niveaux de vibration admissibles ;
24 – Protection par rapport aux défauts : protection contre les surtensions ou les surintensités ;sous-tension, élévation de température, défauts de bobinage, niveau de vibration

A ce stade, le concepteur fait appel à son expertise et à son expérience pour choisir les différents types et structures d'actionneur susceptibles d'y répondre. On peut ainsi définir pour un moteur à aimants permanents : la configuration du moteur, un entrefer radial (rotor intérieur ou extérieur) ou axial, le type d'aimants, les nombres de phases, de pôles et d'encoches, le type d'alimentation : courants sinusoïdaux ou trapézoïdaux. Le bobinage peut aussi être défini à ce stade. Mais même un spécialiste ne peut pas connaître tous les bobinages possibles développés sur plus de 150 ans d'histoire de développement des actionneurs électriques [26]. Il manque une réelle collaboration au niveau international pour rassembler toutes ces connaissances dans un logiciel unique permettant de choisir très rapidement le bobinage. Les logiciels existants actuellement permettent de faire cela mais avec un choix limité [25].

Dimensionnement par des modèles analytiques

Ensuite, le concepteur procède au dimensionnement de chaque structure de moteur choisi. Pour les moteurs à aimants permanents, ils existent différents modèles analytiques de dimensionnement, comme par exemple ceux proposés dans [25] et [27]. Dans la plupart des cas, le concepteur cherche un dimensionnement initial à partir de dimensions de moteurs existants dont les performances sont proches de son cahier des charges. On peut ainsi procéder au dimensionnement « à la main » en utilisant des valeurs typiques de grandeurs que les spécialistes connaissent [25] : le couple par unité de volume, la charge linéique et la densité efficace de courant suivant le type de refroidissement, l'induction magnétique moyenne dans l'entrefer, etc…
Il existe aussi des logiciels qui sont de véritables aides à la conception des moteurs permettant de dimensionner un actionneur électromécanique de manière interactive. A partir d'un dimensionnement initial et par interaction successive avec le logiciel, le concepteur peut arriver à un dimensionnement qui répond au cahier des charges en un temps relativement court. Ce type de logiciels est basé sur des modèles simplifiés de dimensionnement et permet de calculer les formes d'ondes idéales de flux, de f.e.m. ou de couples statiques et de les présenter sous forme d'une sortie graphique permettant de les visualiser à tout moment ainsi qu'un dessin du moteur. Pour un moteur donné, le logiciel doit gérer jusqu'à 500 paramètres [25].

Caractérisation par des modèles numériques

Cependant, les modèles utilisés dans l'étape de dimensionnement sont basés sur des hypothèses simplificatrices dont il est difficile de cerner le domaine de validité car ils dépendent de beaucoup de paramètres. Il faut alors procéder à l'étape de caractérisation du moteur dans lequel on utilise des modèles numériques de type éléments finis pour calculer les caractéristiques électromécaniques, magnétiques ou thermiques de l'actionneur. Les logiciels de calcul du champ électromagnétique adaptés pour les moteurs peuvent donner les courbes

de flux, de f.e.m ou de couples statiques en fonction de la position du rotor [28]. Ces courbes permettent de qualifier réellement les performances du moteur et de définir les stratégies d'alimentation propre au moteur. Certains de ces logiciels permettent de simuler directement le comportement de l'actionneur avec son alimentation électronique grâce au développement des modèles de type champ-circuit et d'analyser ainsi le comportement dynamique du moteur dans différentes situations [29]. Dans leur version originale, ces logiciels sont très lourds à manipuler car il faut procéder à un certain nombre d'étapes : dessin, maillage, résolution et exploitation des données. Certaines versions plus récentes de logiciels offrent des facilités permettant d'obtenir automatiquement le dessin de la structure à partir de la donnée des dimensions du moteur. Des publications récentes permettent de se passer même de l'étape de maillage ou voire de lancer automatiquement les différents calculs [30][31][32].

Apport des méthodes d'optimisation

Les concepteurs de moteurs électriques ont utilisé dès les années 1970 des méthodes d'optimisation pour la conception optimale de moteurs électriques [33]. On peut classer les problèmes d'optimisation suivant la nature des variables qu'ils manipulent. On dit ainsi qu'un problème est continu si ses variables sont des variables réelles. Il est discret quand elles sont toutes entières, booléennes ou de catégories. On dit qu'il est mixte si une partie des variables est continue et l'autre discrète. Ces variables sont reliées entre-elles par un modèle mathématique. Dans le cas des actionneurs électriques, les variables sont mixtes et le modèle peut-être analytique ou numérique. Les variables continues correspondent presque uniquement aux dimensions de l'actionneur. Les variables discrètes permettent quant à elles de caractériser le type, la structure, la configuration et la composition de l'actionneur. Les algorithmes d'optimisation pour la résolution de ces problèmes peuvent être classés en méthodes d'optimisation locale ou globale de type stochastiques ou déterministes [34]. Chaque type méthode peut être associé soit à des modèles analytiques, soit à des modèles numériques.

Méthodes locales d'optimisation et modèles analytiques

Les méthodes locales d'optimisation ont été les premières à être utilisées pour dimensionner les actionneurs électromécaniques. Ces méthodes sont fondées sur les théories de la Programmation Non-Linéaire (PNL) pour la résolution de problèmes avec contraintes [35]. On peut citer par exemple la méthode du Lagrangien Augmenté appelée encore la Méthode des Multiplicateurs ou MOM (Methods of Multipliers) [36]. Ces méthodes ne traitent que des problèmes continus. Les variables entières apparaissant dans un modèle d'actionneur sont alors en général relâchées et traitées comme des variables réelles, elles sont ensuite arrondies à l'entier le plus proche à chaque itération ; cela occasionne des problèmes de convergence de l'algorithme. Ces variables entières peuvent aussi être imposées par le concepteur, ce qui laisse sous entendre qu'il y a autant de problèmes d'optimisation continus que de combinaisons possibles générées par les variables discrètes. En général, les méthodes locales d'optimisation permettent de déterminer les variables continues optimales, i.e. les dimensions, quand les variables entières ou booléennes, i.e. le type, la structure, la configuration et la composition, sont fixées. Ces méthodes sont souvent associées à des modèles analytiques et trouvent généralement qu'un optimum local à partir de la détermination d'un dimensionnement initial mais pas uniquement ; cependant la convergence de la méthode locale choisie dépend fortement de ce point initial. Ce dernier peut être obtenu par exemple à partir d'une procédure classique de conception décrite précédemment. Les méthodes d'optimisation locales peuvent être utiles quand le dimensionnement initial peut-être déduit simplement de moteur existant. L'optimum obtenu dépend du dimensionnement initial choisi et des algorithmes utilisés [37].

Comme un modèle analytique nécessite des hypothèses simplificatrices, il faut alors valider le dimensionnement par un modèle numérique. Des chercheurs ont élaboré des environnements informatiques mettant à disposition du concepteur des méthodes locales d'optimisation, des modèles analytiques de dimensionnement et des modèles numériques de caractérisation ou de validation. Ces environnements facilitent le passage d'une étape à l'autre du processus de conception et la possibilité d'itérer le processus plusieurs fois [38][39][40].
Depuis environ 5 ans, un logiciel nommé Pro@Design a été développé par la société Design Processing Technologies de Grenoble. Il est entièrement dédié à la conception d'actionneurs électromécaniques en associant des modèles analytiques et des méthodes d'optimisation locales.

Méthodes locales d'optimisation et modèles numériques

Certains chercheurs ont, dès les années 1990, associés ces méthodes d'optimisation locales à des modèles numériques de type différences finies ou éléments finis [41][42]. A partir du concept de laboratoire numérique de Muller, ancêtre des environnements informatiques dédiés à la conception d'actionneur, Russenschuck a utilisé les méthodes de la PNL associées à un modèle numérique en différences finies pour optimiser un moteur à aimants permanents [43]. Suivant les algorithmes employés l'optimisation a nécessité entre 50 et 120 calculs par différences finies. Ce type d'évaluations demandait beaucoup de temps à l'époque. Actuellement avec les capacités de calculs d'un ordinateur personnel cela demande beaucoup moins de temps.
Certaines des méthodes de la PNL sont disponibles dans le logiciel *ANSYS® Academic Research*. Nous avons utilisé ce logiciel pour optimiser un coupleur magnétique à aimants permanents. Les figures (Fig 26) et (Fig. 27) montrent le maillage du domaine d'étude du coupleur et le champ magnétique dans la structure initiale.
Dans ce logiciel, l'association des modèles par éléments finis et des méthodes d'optimisation est facilité par l'utilisation d'un langage de programmation APDL (Ansys Programming Design Langage). Cinq variables de dimensionnement ont été définies. Le volume total d'aimants a été optimisé pour avoir un couple de 110 N.m. Le couple a été défini comme une contrainte inégalité valant entre 100 N.m et 120 N.m. Le logiciel calcule alors plusieurs « solutions ». Une solution est faisable quand elle satisfait toute les contraintes. La meilleure solution est une solution faisable et qui a le plus petit volume d'aimant. Plusieurs tests avec ce logiciel ont montré que la meilleur méthode pour ce problème est la méthode d'approximations par sous-problèmes [25].

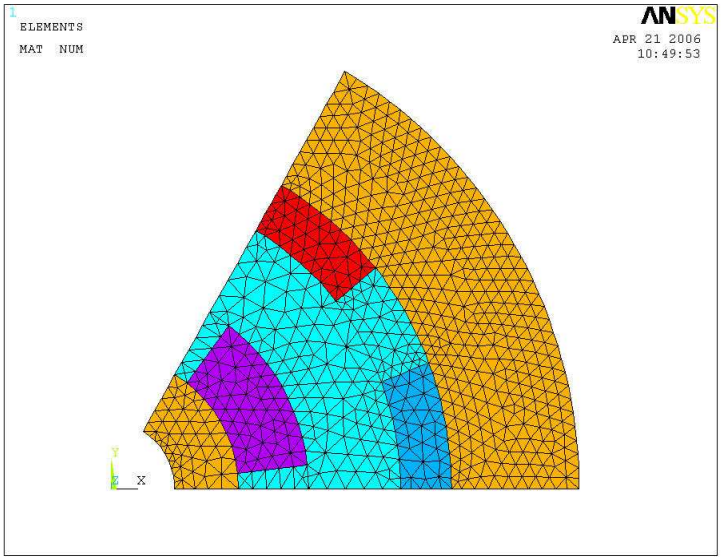

Fig. 26 : Maillage d'un pôle du coupleur

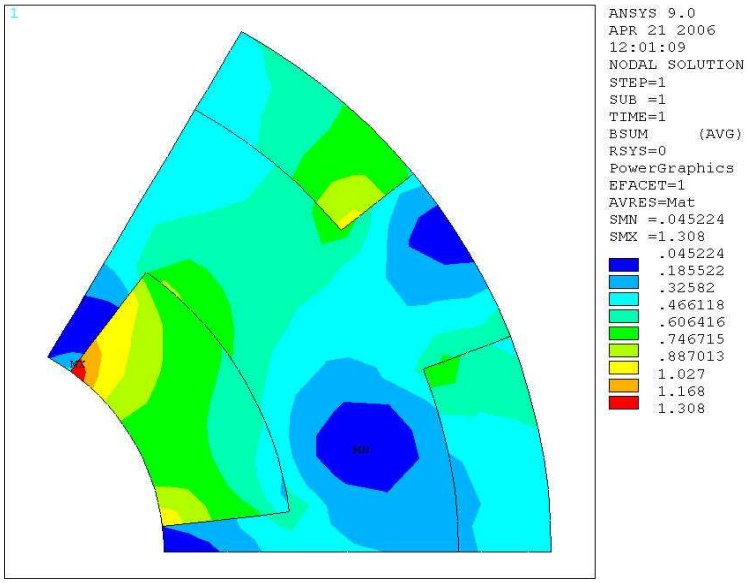

Fig. 27 : Répartition du champ magnétique (B)

Cette méthode d'optimisation est une méthode d'ordre zéro avancée car elle utilise seulement les valeurs des variables dépendantes définissant la fonction objective et les contraintes et non leurs dérivées. Ces variables sont remplacées par des approximations au moyen d'un ajustement par la méthode des moindres carrés, et le problème d'optimisation est alors traduit en un problème d'optimisation sans contrainte utilisant des fonctions de pénalités. La minimisation est alors exécutée sur la fonction approximée et pénalisée (appelée le « sous-problème ») jusqu'à ce qu'il y ait convergence. Puisque cette méthode repose sur l'approximation de chaque variable dépendante, on peut fournir un certains nombre d'échantillons de coupleurs virtuels définis par 5 variables de dimensionnement. Ces données préliminaires peuvent être automatiquement générées à partir d'une solution initiale fournie par l'utilisateur à l'aide d'outils disponibles dans le logiciel. Si elles ne sont pas fournies, la méthode elle-même les génèrera aléatoirement sans beaucoup de garantie quant à la

découverte d'une solution réalisable (satisfaisant les contraintes) [25]. Le logiciel a effectué 27 calculs et a fourni 7 solutions faisables.

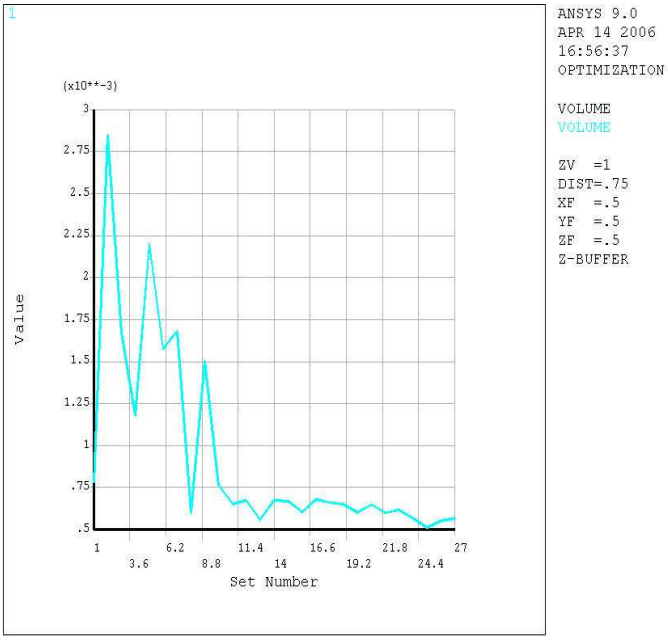

Fig. 28 : Evolution du volume d'aimants (fonction objective) lors des itérations

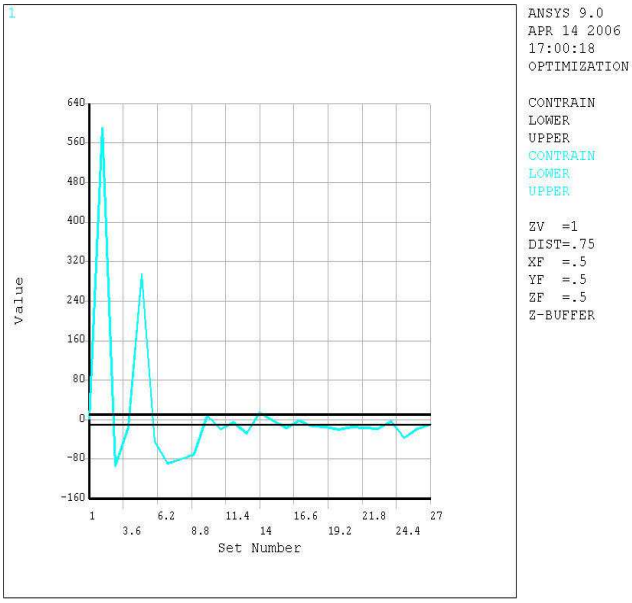

Fig. 29 : Evolution de la contrainte en couple en fonction des itérations

Les figures (Fig. 28) et (Fig. 29) montrent la convergence de la fonction objectif à minimiser et la contrainte de couple (abs(Cref- C) < 0,1 Cref) en 27 itérations. Cette méthode est sensible au choix de la solution initiale. En changeant de 10% les variables de la solution initiale, certains variables varient jusqu'à 20% [25].

CONCLUSION

Le problème de dimensionnement des actionneurs électriques s'est posé au concepteur dès les débuts de l'électrotechnique il y a environ 150 ans. Maintenant les procédures de conception de ces dispositifs sont bien maîtrisées. Cette maîtrise se manifeste ces dernières années par les projets d'élaboration d'environnement ou de plate-forme informatique dans lequel le concepteur trouve les outils de conception tels que les modèles, analytiques ou numériques, ou les méthodes d'optimisation, avec une offre de service qui permet de passer d'une étape de conception à une autre de manière quasi-instantanée et sans pertes d'informations.
Un effort important a été fait par la communauté électrotechnique sur la mise au point de modèle analytique de dimensionnement et des modèles numériques ainsi que des passerelles basés sur des méthodes d'identification pour déduire les premières des secondes. Plusieurs d'électrotechniciens ont beaucoup investit non seulement dans les méthodes d'optimisation, d'analyses numériques mais aussi dans les outils informatiques tels que la Programmation Orientée Objet pour offrir au concepteur des facilités lui permettant en un temps de plus en plus réduit de concevoir les actionneurs les plus performants pour une application donnée.
Cependant, il reste de réelles difficultés pour automatiser la conception d'un actionneur électrique même pour des structures d'actionneur très connu et en apparence peu complexe comme les moteurs à aimants permanents : la prise en compte de manière exhaustive des bobinages possibles, la prise en compte des pertes par hystérésis et par courants de Foucault. La possibilité d'accéder à l'optimum global avec les modèles les plus sûrs, c'est-à-dire l'association des méthodes d'optimisation globale avec des modèles nécessitant le minimum d'hypothèses, reste des questions ouvertes.

Références

[1] P. Janker, D. van de Bossche ,"Actuator technology – Driver of Aerospace Systems Innovation", Actuator 2004, 9th International Conference on New Actuators, 14-16 June 2004, Bremen, Germany

[2] D van den Bossche, "More Electric Control Surface Actuation – A Standard for the Next Generation for Transport Aircraft", Conférence EPE'2003, 2-4 Septembre, Toulouse

[3] S. L. Botten, C. R. Whitley and A. D. King, "Flight Control Actuation Technology for Next-Generation All-Electric Aircraft", Technology Review Journal, Millenum Issue, Fall/Winter 2000

[4] N. Robert, "Performance of an Electrohydrostatic Actuator on the F-18 Systems Research Aircraft",NASA TM-97-206224, October 1997

[5] J. Andersson et al., "Modelling and Simulation of Heat Generation in Electrohydrostatic Actuation Systems", 4th JHPS International Symposium on Fluid Power, Tokyo, Japan, 15-17 November, 1999

[6] Y. Alhassoun,"Etude et mise en oeuvre de machines à aimantation induite fonctionnant à haute vitesse", Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005

[7] S. Croke, J. Herrenschmidt, "More electric initiative – Power-by-Wire Actuation Alternatives ", Aerospace and electronics conference, 1994, NAECON 1994, 23-27 Mai 1994, pp 1348-1346, vol.2

[8] E. Levi,"Recent development in high performance variable speed induction motor drives",6th International Symposium Nikola Tesle, 18-20 October 2006, Belgrade, SASA, Serbia

[9] G. M. Liaw and F. J. Linn, "A Robust Speed Controller for Induction Motor Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 41, n°3, June 1994

[10] I. G. Hansen, "Variable Speed Induction Motor Operating from a 20kHz power bus", IECEC 1989, pp. 561-565

[11]S. R. MacMinn and J. W. Sember, "Control Of a Switched-Reluctance Aircraft Engine Starter Generator Over a Very Wide Speed Range", IEEE IECEC Record, 1989, pp 631-638

[12]S. R. MacMinn and W.D. Jones, "A very High Speed Switched-Reluctance Starter-Generator for Aircraft Engine Application", IEEE-IECEC Record, 1989, pp 1758-764

[13] J. J. Gribble et al, "Feasibilty study of a large switched reluctance spoiler actuator system", IEE Colloquium on All Electric Aircraft London, 17th June 1998

[14] C. Cossar et al,"The Design of a Switched Reluctance Drive for Aircraft Flight Control Surface Actuation", IEE Colloquium. Electrical Machines and Systems for the More Electric Aircraft, London, UK, 9 Nov. 1999

[15] K. Atallah et al,"Comparison of electrical drive technologies for aircraft flight control surface actuation", 9th International Conference on Electrical Machine and Drives, Conference publication n° 468, IEE, 1999

[16] P. M. Churn et al, "Electro-hydraulic actuation of primary flight control surfaces", IEE Colloquium on All Electric Aircraft (Digest No. 1998/260), 17 June 1998

[17] K. Atallah et al, "Permanent Magnet Brushless Drives for Aircraft Flight Control Surface Actuation", IEE Colloquium. Electrical Machines and Systems for the More Electric Aircraft London, UK, 9 Nov. 1999

[18] A. G Jack, B. C. Mecrow, J. A. Haylock, " A Comparative Study of Permanent Magnet and Switched Reluctance Motors for High-Performance Fault-tolerant Applications", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 32, pp. 889–895, July/Aug. 1996.

[19] G. J. Atkinson, et al, "The Analysis of Losses in High-Power Fault-Tolerant Machines for Aerospace Applications ", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 42, n°5, pp 1162-1170 September/October 2006
[20] NOGAREDE B., Conception des dispositifs électroactifs : de la recherche du concept au dimensionnement de la structure, Habilitation à Diriger des Recherches, INP Toulouse, 1997.
[21] KONE A D, Contribution à la conception des actionneurs électriques par formulation en termes d'optimisation, Thèse de Doctorat INP Toulouse, 1993
[22] NOGAREDE B., Machines tournantes : principes et constitution, Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Electrique, D3411
[23] NOGAREDE B., L'Electrodynamique Appliquée, Editions Dunod, Collection Sciences Sup, 2005
[24] CAVAREC P-E, BEN AHMED H., MULTON B., Actionneurs électromagnétiques: Classification topologique, Techniques de l'Ingénieur, D3412
[25] HENDERSHOT J. R., MILLER TJE, Design of brushless permanent-magnet motors, Magna Physics Publishing, Oxford, 1996
[26] SAINT-MICHEL J, Bobinage des machines tournantes à courant alternative, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie Electrique, D 3420
[27] LIU X, SLEMON GR, Modeling and design optimiztion of permanent magnet motors, Electric Machines and Power Systems, pp 131-164, 1992
[28] SADOWSKI N, Modélisation des machines électriques à partir de la resolution des equations du champ en tenant compte du movement et du circuit d'alimentation (Logiciel Efcad], Thèse de Doctorat de l'INP Toulouse, 1993
[29] BASTOS JPA, SADOWSKI N, Electromagnetic modeling by finite element methods, Marcel Dekker, 2003
[30] LEFEVRE Y, FONTCHASTAGNER Y, MESSINE F, Building a CAD System For Educational Purpose Based Only on a Mesh Tool and Finite Element Solver, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, n°4, April 2006 pp 1483-1486
[31] LACOMBE G, FOGGIA A, MARECHAL Y, BRUNOTTE X, WENDING P, From General Finite Element Simulation Software to Engineering-Focused Software: Example of Brushless Permanent Magnet Motors Design, IEEE Transactions on Magnetics, vol 43, Issue 4, April 2007, pp 1657-1660
[32] GRIFFITHS D R, SYKULSKI JK, Automation of finite-element aided design of induction motors using multi-slice 2D models, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol. 25, n° 2, 2006, pp 309-319
[33] RAMARATHNAM R et al., A Comparative Study of Minimization Techniques for Optimization of Induction Motor Design, IEEE Trans. PAS-92, 1973, n°5, pp 1448-1453
[34] MESSINE F, L'Optimisation Globale par Intervalles: de l'Etude Théorique aux Applications, Habilitation à Diriger des Recherche, INP Toulouse, 2006
[35] LIU X, SLEMON G.R., An improved Method or Optimization for Electrical Machines, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 6, n°3, September 1991, pp 492-496
[36] KONE A D, NOGAREDE B, LAJOIE-MAZENC M, Le dimensionnement des actionneurs électriques: problème de programmation non linéaire, Journal de Physique III, France, 3, 1993, pp 285-301
[37] WURTZ F, BIGEON J, A Methodology and a Tool for the Computer Aided Design with Constraints of Electrical Devices, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 32, n°3, May, 1996
[38] WURTZ F et al, Methodological Guidelines for the use of Analytical and Numerical in a Design Process of an Electromagnetic Device, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 34, n°5, September 1998

[39] COLYER B et al, Project MIDAS: Magnet Integrated Design and Analysis System, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 33, n°2, March 1997
[40] BIDDLECOMBE et al, Design Environment Modules for Non-Specialist Users of EM Software, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, n°5, September 1994
[41] SCHAFER-JOTER M, MULLER W, Optimization of Electrotechnical Devices Using a Numerical Laboratory, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 26, n°2, March 1990
[42] WATTERSON et al, Optimisation of Permanent Magnet Motors Using Field Calculations of Increasing Precision, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 28, n°2, March 1992
[43] RUSSENSCHUCK S, Mathematical Optimization Techniques for the Design of Permanent Magnet Synchronous Machines Based on Numerical Field Calculation, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 26, n°2, March 1990
[44] BUI X. T. A, Optimisation d'actionneurs électriques à l'aide d'un modèle numérique sous le logiciel ANSYS Multi-Physics, Rapport de Stage de Master Recherche, Université Paul Sabatier et INP Toulouse, Année 2005-2006